



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

**HODNOCENÍ PORUCH KAMENNÝCH SLOUPŮ
S VYUŽITÍM ULTRAZVUKOVÉ METODY**

EVALUATION OF STONE COLUMN DEFECTS USING AN ULTRASONIC METHOD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Šárka Kršková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR CIKRLE, Ph.D.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Šárka Kršková
Název	Hodnocení poruch kamenných sloupů s využitím ultrazvukové metody
Vedoucí práce	doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2017
Datum odevzdání	25. 5. 2018

V Brně dne 30. 11. 2017

doc. Ing. Pavel Schmid, Ph.D.
Vedoucí ústavu



prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Cikrle, P. a kol. Diagnostické metody ve stavebnictví. Studijní opora, VUT v Brně FAST, 2011
Holický, M. a kol. Příručka pro hodnocení existujících konstrukcí. 1. vydání Praha: ČVUT, 2007.
Škabrada, J., Konstrukce historických staveb, Praha, Argo, 2007
Slouka, J. Kámen: od horniny k soše. Praha: Grada, 2007.
Rošický, V., Tichý, E. Kamenictví: tradice z pohledu dneška. 2., upr. a dopl. vyd. Praha: Grada, 2001. Stavitel.
Velflík, A. V. Nauka o staveních hmotách, zvláště o horninách technicky významných, o jejich zkoumání a zpracování. Praha, 1917. Česká matice technická.
ČSN ISO 13822, ČSN 730038, ČSN 733251, ČSN EN 1926, ČSN EN 1936, ČSN EN 14579 a další platné normy.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Teoretická část

Rešerše pramenů, přehled druhů hornin pro kamenné stavby na území ČR.

Hlavní zásady pro hodnocení kamenných konstrukcí - možné aplikace ČSN ISO 13822.

Stručný přehled metod pro zkoušení stavebního kamene v laboratoři a v terénu.

Podrobný popis ultrazvukové metody se zaměřením na zkoušení kamene.

Praktická část:

Laboratorní měření na vzorcích kamene - stanovení rychlosti šíření ultrazvukového vlnění, objemové hmotnosti, pevnosti v tlaku.

Tabelární a grafické zpracování výsledků zkoušek.

Aplikace ultrazvukové metody na konkrétním případě hodnocení poškozených kamenných prvků - sloupů.

Popis metodiky měření, provedení zkoušek in situ, tabelární a grafické zpracování výsledků měření, formulace závěrů.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá hodnocením poruch kamenných sloupů pomocí ultrazvukové metody. Obsah této práce je rozdělen na část teoretickou a praktickou. Teoretická část je zaměřena na popis postupu hodnocení existujících kamenných konstrukcí dle normy ČSN ISO 13822 a na výčet metod pro zkoušení kamene. Jsou zde také stručně popsány vybrané druhy hornin používané pro kamenné stavby. Praktická část je složena ze zkoušek provedených na sloupech na místě pomocí ultrazvukové metody a laboratorních zkoušek na vybraných vzorcích. Vyhodnocení měření pomocí ultrazvukové metody je založeno na znalosti této metody a na vizuální prohlídce sloupů. Při laboratorním měření byly porovnávány výsledky vybraných vlastností na vzorcích stejného druhu horniny různého tvaru, vlhkosti a rozměrů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hodnocení poruch konstrukcí, kamenné konstrukce, zkoušky přírodního kamene, zkoušení, diagnostika, ultrazvuková metoda, pískovec

ABSTRACT

This Bachelor thesis deals with evaluation of structure defects in stone column using ultrasonic method. Content of this thesis is divided to theoretical and practical part. Aim of theoretical part is to explain process of evaluation of existing stone structures according to norm ČSN ISO 13822. This part also contains listings of method for stone testing and brief explanation of chosen types of rock used for stone structures. Practical part contains tests used on columns using ultrasonic method and laboratory tests of chosen samples. Evaluation of measuring using ultrasonic method is based on knowledge of this method and visual inspection of columns. In laboratory tests were compared results of chosen properties on examples of same type of rock. These examples had different shape, moisture and measurement.

KEYWORDS

Evaluation of structure defects, stone structure, tests of natural stone, testing, diagnostics, ultrasonic method, sandstone

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Šárka Kršková *Hodnocení poruch kamenných sloupů s využitím ultrazvukové metody*. Brno, 2018. 73 s., 14 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2018

Šárka Kršková

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mé práce bakalářské práce, doc. Ing. Petru Cikrlovi, Ph.D., za odborné vedení, odborné rady, pomoc při měření a za jeho vstřícnost a ochotu po celou dobu zpracovávání této práce.

Děkuji také všem, kteří mě podporovali po celou dobu mého studia.

OBSAH

1	ÚVOD	10
1.1	Úvodní část.....	10
1.2	Cíle práce.....	11
2	TEORETICKÁ ČÁST	12
2.1	Přírodní kámen ve stavebnictví na území ČR	12
2.1.1	Žula	12
2.1.2	Pískovec.....	15
2.2	Hodnocení kamenných konstrukcí	18
2.2.1	Podrobný postup hodnocení konstrukcí	19
2.2.2	Upřesnění postupu hodnocení pro kamenné stavby	21
2.3	Stručný přehled metod zkoušení stavebního kamene.....	24
2.3.1	Stanovení nasákavosti vodou za atmosférického tlaku	24
2.3.2	Stanovení objemové hmotnosti.....	25
2.3.3	Stanovení pevnosti v prostém tlaku.....	25
2.4	Ultrazvuková metoda	27
2.4.1	Obecný popis ultrazvukové metody.....	27
2.4.2	Měřicí přístroje.....	28
2.4.3	Specifika určování rychlosti šíření zvuku přírodního kamene.....	29
3	PRAKTICKÁ ČÁST	31
3.1	Hodnocení kamenných sloupů zámku Bučovice	31
3.1.1	Stručné informace o objektu.....	31
3.1.2	Označení a popis měřených sloupů	32
3.1.3	Postup hodnocení	34
3.1.4	Detailní rozbor vybraných sloupů	35
3.1.5	Výsledky	44

3.1.6	Shrnutí.....	46
3.2	Laboratorní měření	47
3.2.1	Popis laboratorních vzorků	47
3.2.2	Stanovení nasákavosti vodou za atmosférického tlaku	49
3.2.3	Stanovení objemové hmotnosti.....	50
3.2.4	Stanovení pevnosti v tlaku	51
3.2.5	Stanovení rychlosti šíření ultrazvuku	52
3.2.6	Výsledky laboratorního měření.....	64
3.2.7	Shrnutí laboratorního měření	65
4	ZÁVĚR	67
	SEZNAM CITOVANÝCH ZDROJŮ	68
	SEZNAM OBRÁZKŮ	71
	SEZNAM GRAFŮ	72
	SEZNAM TABULEK	73
	SEZNAM PŘÍLOH	73

1 ÚVOD

1.1 Úvodní část

V České republice se nachází velké množství kamenných staveb, které jsou pro náš stát historicky a esteticky významné. Konstrukce těchto staveb jsou většinou velmi staré a pro prodloužení jejich životnosti a provozuschopnosti je důležité je nadále zkoumat.

Kámen je anizotropní a heterogenní materiál a je nutné brát zřetel na jeho genetický a geografický původ, neboť i kámen stejného druhu pocházející z různých lokalit, může vykazovat odlišné vlastnosti [1]. První kapitola teoretické části je zaměřena na popsání a příklady nejběžněji používaných hornin pro stavby v ČR. Práce se zaměřuje na žulu a pískovec.

Hodnocení staveb je významným technickým úkolem. Hodnocení konstrukcí vychází z normy ČSN ISO 13822 [2], která je ovšem skoupá na pravidla pro hodnocení kamenných konstrukcí. Při provádění zkoušek materiálu kamenných staveb lze využít metod pro zkoušení kamenného zdiva. Práce s kamennými stavbami vyžaduje multidisciplinární přístup. Projektová dokumentace objektu, vzhledem k jeho velkému stáří, většinou není dostupná. Hodnotitel konstrukce by měl mít znalosti nejen ze stavebního inženýrství, ale měl by znát i geologické vlastnosti materiálu [1]. Mimořádný význam má i znalost základních fyzikálních a mechanických vlastností horniny, bez kterých se při posouzení konstrukce nelze obejít. Problémem hodnocení kamenných konstrukcí v České republice je nedostatek odborníků, zaměřených přímo na hodnocení kamenných konstrukcí, tudíž neexistuje dostatečné množství publikací, které by poukazovaly na specifické problémy kamenných staveb.

Mezi nejvýznamnější vlastnosti patří objemová hmotnost, pevnost v tlaku a nasákavost. Tyto vlastnosti jsou stanoveny na základě příslušných norem, které jsou pro přírodní kámen dostatečně obsáhlé. Při zkoušení kamenných staveb je nutné brát ohled na jejich stáří a památkovou hodnotu, a tudíž vybrat diagnostickou metodu, která příliš neovlivní historický ráz stavby.

Tato bakalářská práce přináší shrnutí přístupu k hodnocení kamenných konstrukcí. Jsou zde také popsány základní materiálové charakteristiky hornin nejvíce obvyklých pro stavby v České republice. Druhá část práce je věnována posouzení kamenných sloupů zámku Bučovice, který je významnou renesanční stavbou a zachování jeho provozuschopnosti je zásadní. Vzhledem k památkové hodnotě objektu byla použita pouze nedestruktivní metoda. Pro ultrazvukovou metodu není jasné dáno, jak postupovat v případě vyhodnocení měření kruhového průřezu, tudíž při zpracování výsledků byla snaha vyjádřit naměřené hodnoty tak, aby co nejlépe vizuálně vyjadřovaly míru poškození. V poslední části jsou pak vyhodnoceny zkoušky provedené na jiných

vzorcích pískovce, neboť do konstrukce historické stavby zámku nebylo možné zasahovat a odebrat z ní vzorky pro zkoušení v laboratoři.

1.2 Cíle práce

Cíle práce vycházejí ze zadání bakalářské práce. Práce je rozdělená na část teoretickou a praktickou.

Cílem teoretické části je rešerše pramenů, týkajících se vybraných druhů hornin používaných pro kamenné stavby v České republice. Dále se práce zabývá ucelením postupu pro hodnocení kamenných staveb a popisem diagnostických metod, kterých lze využít při průzkumu objektu.

Praktická část je rozdělená na dvě části. V první části je popsáno zkoušení in situ na pískovcových sloupech zámku v Bučovicích. Ve druhé části jsou zkoumána zkušební tělesa pískovce pro porovnání s měřením na sloupech. Na tělesech byly stanoveny vybrané vlastnosti, které jsou důležité pro přírodní kámen určený ke kamenickému zpracování.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Přírodní kámen ve stavebnictví na území ČR

Historie kamenictví v České republice je odrazem geologických poměrů v naší zemi. Území ČR je neobyčejně složité a nachází se na něm všechny druhy hornin nejrozličnějších stárí. Zastoupení hornin sedimentárních, magmatických a metamorfovaných nelze přesně stanovit, neboť hranice mezi sedimentárními a metamorfovanými horninami jsou pozvolné a bývají voleny různě [3].

Pro kamenné stavby jsou horniny vybírány podle jejich vzhledu. Rozhodující je, jak bude ve výsledku kámen v konstrukci vypadat. Stejnou měrou se na výběru kamene podílí jeho fyzikálně mechanické vlastnosti. Mezi těmito přístupy je určitá disproporce, což znamená, že dobře vypadající kámen může mít horší vlastnosti a naopak. Stejně vlastnosti jsou poté využívány pro hodnocení těchto konstrukcí [1]. Mezi vlastnosti hornin, jež mají mimořádný význam pro stavebnictví, patří nasákavost, objemová hmotnost, pevnost v tlaku a mrazuvzdornost. Základní technické parametry přírodního stavebního kamene pro kamenické výrobky jsou uvedeny v normě ČSN 72 1800 [4].

Z hlediska základního rozdělení neexistuje skupina, která by nebyla vhodná pro kamenickou výrobu. Zpracovávat je možné horniny magmatické, sedimentární i metamorfované ale v různém rozsahu. Nejuniverzálnější použití mají hlubinné vyvřeliny, převážně žula (granit) a sedimentárním horninám vládne pískovec [1]. Tato práce se v následujících dvou kapitolách podrobně zaměří právě na tyto dvě zmíněné horniny.

2.1.1 Žula

Žula (granit) je masivní, nepoddajný, odolný kámen, často pro své vlastnosti používaný na výrobu robustních a monumentálních staveb [1]. Patří do skupiny hlubinných vyvřelých hornin. Složení granitu je velmi proměnlivé, vždy ale převládá křemen, K-živce a slídy (muskovit nebo biotit). Žula má středně zrnitou až hrubozrnou strukturu a její barva je převážně světle šedá (barev existuje více, záleží na přesném mineralogickém složení) [5].

Tabulka 2.1.1-1 Základní technické požadavky žuly pro kamenické výrobky

Název horniny	Objemová hmotnost ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Pevnost v tlaku (MPa)	Pevnost v tahu za ohybu (MPa)	Nasákavost (%)
granit (žula)	2 500	90	6	0,7

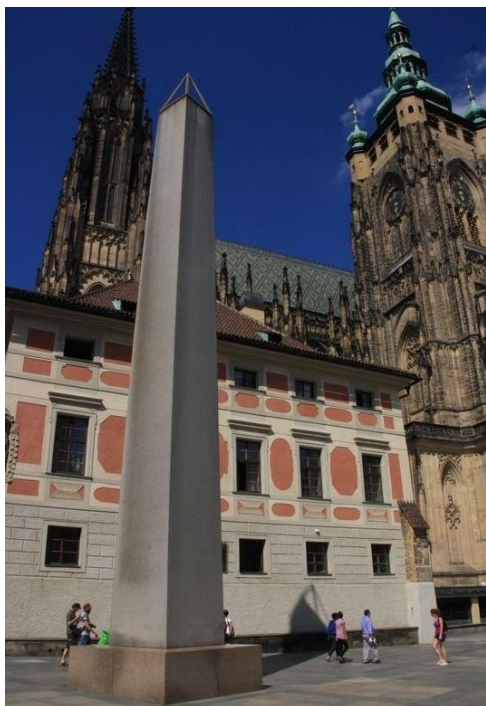
Největší ložiska granitu v ČR jsou rozložená převážně do dvou oblastí. První oblastí je střeodočeský pluton (Praha, Posázaví, střední Povltaví až Příbramsko). Mezi nejznámější ložiska granitu této oblasti patří lom Horní Požáry u Prosečnice na Sázavě (světle šedý granit), lom Vápenice a Bořená Hora ležící nedaleko Sedlčan (tmavý porfyrický granit). Druhou oblastí je centrální moldanubický pluton (Vysočina). Do této oblasti patří lom Mrákotín.

Příklady žulových staveb

Granit prošel všemi architektonickými slohy, ovšem jeho největší rozmach nastal v 19. století vlivem pokroku technologií v lomařství. Na přelomu 20. století vzrostla obliba žuly jako obkladového prvku. Používá se v podobě desek nebo kyklopského zdiva k obkládání staveb nebo mostních pilířů. Velmi obvyklé je použití růžové žuly v podobě dlažeb, obkladů i schodišť. V současnosti se běžně žula ve velkém množství používá k výrobě obrubníku a dlažebních kostek. Z hlediska uměleckého je žula často využívána pro památníky nebo monumentální stavby [1].

Mrákotínská žula

Nejznámějším zástupcem je obelisk, který dokonce dostal po nalezišti této žuly jméno. Tato žula se těží v okolí Mrákotína u Telče. Mrákotínský monolit se nachází na nádvoří Pražského hradu.



Obrázek 2.1.1-1 Mrákotínský monolit [6]

Z mrákotínské žuly byla vyrobena monumentální mísa umístěná v Rájské zahradě Pražského hradu nebo odstraněný Pomník československým legionářům.

Požárská žula

Právě z požárské žuly byla vyrobena náhrada za pomník legionářům a dostala jméno Praha svým vítězným synům. Tento pomník je umístěn na náměstí Pod Emauzy v Praze.

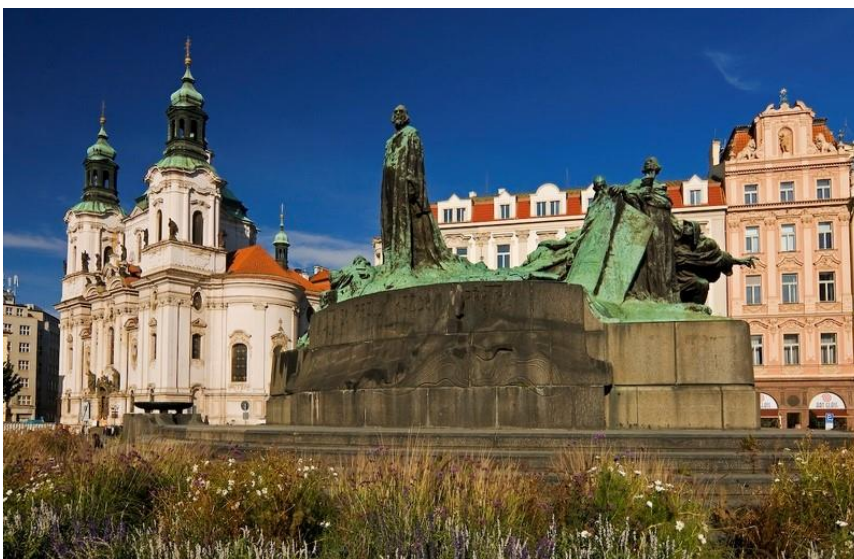


Obrázek 2.1.1-2 Pomník Praha svým vítězným synům [7]

Z požárské žuly je dále vyrobeno například ozdobné zábradlí v okrasné zahradě Na Valech (Pražský hrad).

Sedlčanská žula

Z této žuly je vyroben podstavec pomníku Jana Husa na Staroměstském náměstí nebo kašna před vstupem do Karolina v Praze.



Obrázek 2.1.1-3 Pomník Jana Husa na Staroměstském náměstí [8]

Říčanská žula

Nádherným příkladem užití ve stavebnictví je kostel Nanebevzetí Panny Marie v Mukařově u Říčan. Kostel je postaven z opracovaných kvádrů říčanské žuly ze zdejších lomů.



Obrázek 2.1.1-4 Kostel Nanebevzetí Panny Marie v Mukařově [9]

Mezi další používané žuly patří například lipnická, nečínská, dolnobřezinecká, hlinecká, liberecká aj.

2.1.2 Pískovec

Pískovec patří mezi nejrozšířenější horniny v ČR. Je dobře opracovatelný, soudržný a odolný kámen. Nevýhodou je degradace vzhledu jeho povrchových vrstev působením povětrnostních vlivů a také nemožnost leštění jeho povrchu [1]. Pískovec tvoří velkou skupinu klastických sedimentů. Existují pískovce jemnozrnné (zrna 0,0063-0,5 mm), střednězrnné (zrna 0,5-1,0 mm) a hrubozrnné (zrna větší než 1 mm). Prostor mezi zrny je vyplněn pojivem (tmelem). Podle druhu materiálu, který zrna stmeluje, rozeznáváme tmel křemičitý, vápnitý, železitý apod. Vlastnosti pískovce jsou ovlivněny kvalitou a množstvím tmelu a také původem horniny [5].

Tabulka 2.1.2-1 Základní technické parametry pískovce pro kamenické výrobky

Název horniny	Objemová hmotnost ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Pevnost v tlaku (MPa)	Pevnost v tahu za ohybu (MPa)	Nasákavost (%)
hutný pískovec	2 500	40	5	5,0
pórovitý pískovec	1 800	15	2	15,0

Mezi největší pískovcová naleziště patří lomy v okolí Hořic (Podhorní Újezd, Boháňka). Božanovský pískovec pochází z Božanova (Broumovsko), žehrovický pískovec se těžil v Kamenných Žehrovicích (Kladensko). K moravským nalezištím patří Maletín u Mohelnice (maletínský pískovec) [1].

Příklady pískovcových staveb

Vzhledem k tomu, že Česká republika v minulosti patřila k pískovcové velmoci, je oproti žule složitější vybrat vhodné ukázky staveb, protože v ČR je opravdu z čeho vybírat. Rozmach používání pískovce nastal ve 14. století a jeho obliba přetrvala do současnosti. Kámen lze těžit ve velkých blocích, ze kterých je možné vytesat téměř neomezený tvar [1].

Hořícký pískovec

Tvoří plášť budovy pražského Rudolfinum a 32 soch na balustrádě jeho hlavní římsy. Byl také použit na rekonstrukci Karlova mostu, včetně několika replik soch na něm umístěných. Dále je možné ho vidět na Chrámu svaté Barbory v Kutné Hoře, Mlýnské kolonádě v Karlových Varech, balustrádě budovy Národního muzea v Praze.



Obrázek 2.1.2-1 Rudolfinum v Praze [10]



Obrázek 2.1.2-2 Chrám svaté Barbory v Kutné Hoře [11]

Božanovský pískovec

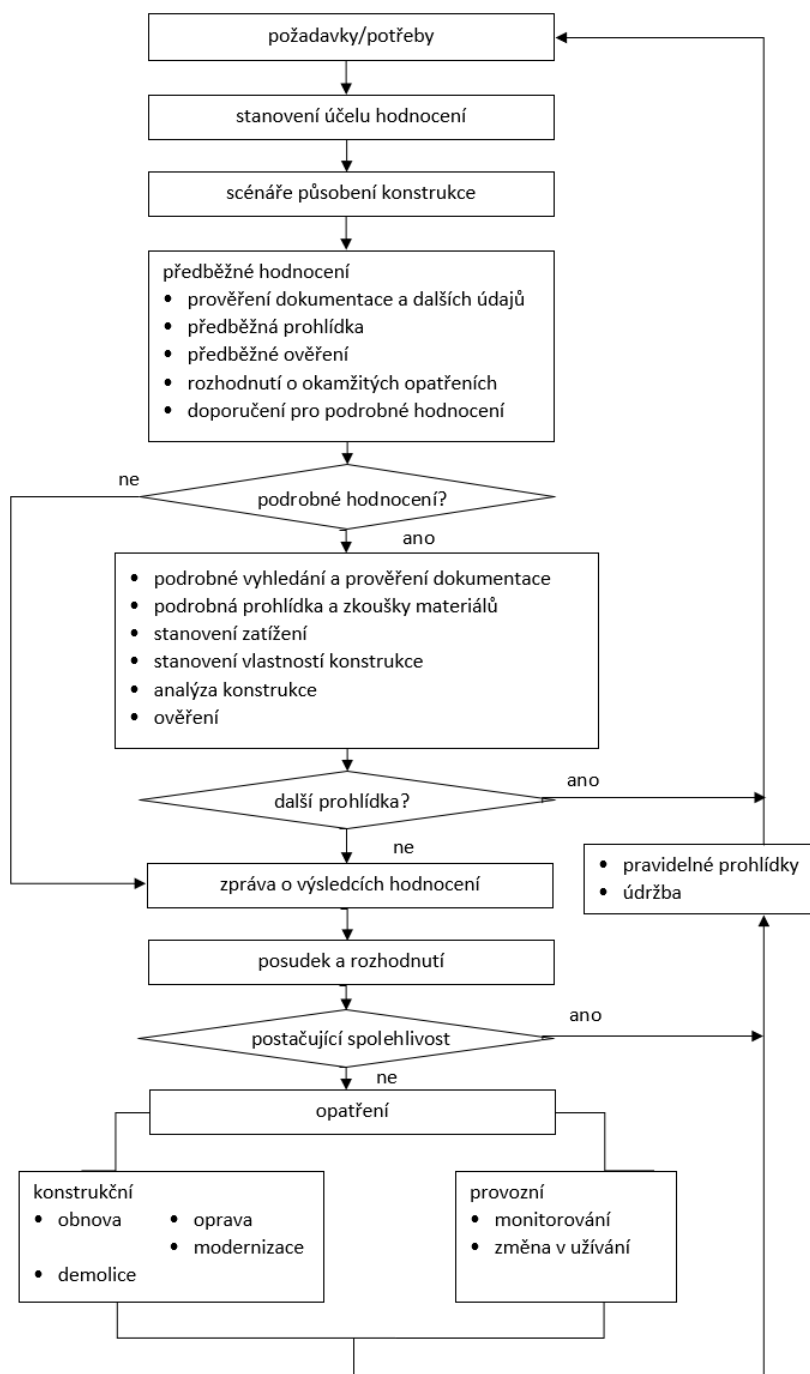
Tento pískovec byl použit na repliky soch Karlova mostu. Užití božanovského pískovce na moderní stavbě představuje kamenný obklad administrativní budovy Gamma BB-Centra v Praze 4.



Obrázek 2.1.2-3 Replika sochy sv. Anny [12] Obrázek 2.1.2-4 Budova Gamma BB-Centra [13]

2.2 Hodnocení kamenných konstrukcí

V této kapitole je popsán postup, který je používán při hodnocení konstrukcí a opírá se především o poznatky z ČSN ISO 13822 doplněné o informace zpřesňující hodnocení kamenných konstrukcí. Tento postup je složen z dílčích částí, které jsou zobrazeny v obrázku 2.2-1 a v následující podkapitole jsou podrobně popsány.



Obrázek 2.1.2-1 Vývojový diagram postupu hodnocení existujících konstrukcí [2]

Hodnocení existujících konstrukcí je významným technickým úkolem, při němž je nutné aplikovat znalosti nad rámec návrhových norem [2]. Hodnotitel by měl využívat všeobecných znalostí stavebního inženýrství.

Nezbytné je stanovit účel hodnocení konstrukce z hlediska požadavků na její budoucí funkční způsobilost. Poté je k vypracování návrhu přestavby důležité stanovit stav konstrukce, především její vady a poruchy, vlastnosti materiálů a základové půdy, vliv prostředí, druhy a velikosti zatížení, která na konstrukci působí nebo v minulosti působila [14].

2.2.1 Podrobný postup hodnocení konstrukcí

Stanovení účelu hodnocení

Účel hodnocení existující konstrukce se stanoví na základě konzultací s objednatelem, jímž může být vlastník, pojišťovací společnosti aj. Jsou stanoveny požadavky na budoucí funkční způsobilost, která vychází z následujících úrovní:

- a) úroveň bezpečnosti poskytující uživatelům konstrukce odpovídající bezpečnost;
- b) úroveň trvale udržitelných funkčních vlastností poskytující nepřetržitou funkčnost pro speciální stavby (např. nemocnice, významné budovy, klíčové mosty zatížené mimořádným zatížením jako je zemětřesení, náraz nebo jiné předvídatelné nebezpečí);
- c) úroveň speciálních funkčních vlastností, která závisí na požadavcích objednatele (vlastnosti týkající se vlastnictví nebo použitelnosti) [2].

Scénáře

Určí se plán bezpečnostních opatření, jehož součástí jsou scénáře vyjadřující kritické situace, které mohou nastat vlivem změn konstrukčních podmínek nebo zatížení působícího na konstrukci. Každý scénář je charakterizován hlavním procesem nebo zatížením, a případně jedním nebo více vedlejšími procesy a zatíženími. Rozlišení scénářů je významné pro hodnocení a návrh opatření vedoucích k zajištění bezpečnosti a použitelnosti stavby.

Předběžné hodnocení

Základem předběžného hodnocení je studium dostupné projektové dokumentace a zpráv z prohlídek a zároveň ověření jejich správnosti, plnosti aktuálnosti. Zaznamenány by v nich měli být předchozí konstrukční opatření, významné vlivy prostředí nebo seizmická zatížení, extrémní zatížení, změny v založení konstrukce, poškození korozí a nesprávné využití konstrukce [2].

Následujícím krokem je předběžná prohlídka. Záměrem prohlídky je určení typu konstrukčního systému a možného poškození jednotlivých částí pomocí vizuálního posouzení a jednoduchých pomůcek. Z této prohlídky jsou získány základní informace o vlastnostech povrchu, viditelných deformacích, trhlinách atd. Výsledkem předběžné prohlídky je stanovení míry poškození konstrukce (žádné, menší, mírné, závažné, destrukční, neznámé) [2].

Předběžná ověření mají za úkol rozeznat kritické nedostatky ovlivňující bezpečnost a použitelnost konstrukce. Na tyto nedostatky je nutné se zaměřit a na základě jejich šetření se hodnotitel rozhodne, zdali je nutné provádět další průzkum či nikoli [2].

Pokud z předběžné prohlídky a předběžných ověření vyplývá, že se konstrukce nachází v potenciálně nebezpečném stavu, je hodnotitel povinen tuto skutečnost oznámit objednateli. Ten musí na základě jeho doporučení provést okamžitá opatření ke snížení nebezpečí s ohledem na bezpečnost veřejnosti [2].

Z předběžného ověření může vyplynout, že konstrukci lze považovat během uvažované zbytkové životnosti za spolehlivou a v těchto případech není nutné provádět podrobné hodnocení. Jestliže jsou vyšetřeny nesrovnalosti v zatíženích, v účincích zatížení nebo ve vlastnostech konstrukce, je doporučeno provedení podrobného hodnocení [2].

Podrobné hodnocení

Začátkem podrobného hodnocení je podrobná analýza dostupné dokumentace. Pokud je dokumentace dostupná, hodnotitel se musí zaměřit zejména na výkresy, statický výpočet, stavební deník, záznamy o prohlídkách a údržbě, prováděcí předpisy a normy užívané při výstavbě konstrukce, topografii, základové podmínky, úroveň hladiny podzemní vody v místě stavby [2].

Postup podrobné prohlídky se stanoví na základě dostupných informací. Pokud konstrukční detaily, rozměry konstrukce a charakteristické hodnoty materiálů nelze určit na základě dokumentace, pak jsou určeny během podrobné prohlídky. Výstupem podrobné prohlídky je soubor hodnot nebo pravděpodobnostních rozdělení pro vybrané parametry, které ovlivňují stav konstrukce [2].

Pro stanovení zatížení a jeho účinků se aplikuje norma ISO 2394 – Obecné zásady spolehlivosti konstrukcí. Výsledná únosnost nosných prvků se určí na základě výsledků analýzy s ohledem na účinky zatížení a degradaci konstrukce.

Podle ISO 2394 nebo rovnocenných norem je provedeno ověření existující konstrukce pro zabezpečení požadované úrovně funkční způsobilosti [2].

Výsledky hodnocení

Výsledky šetření jsou uvedeny ve zprávě, jejíž přesné uspořádání je obsaženo v příloze G normy [2].

Pokud se prokáží závažné nedostatky, ovlivňující bezpečnost nebo použitelnost konstrukce, pak se s přihlédnutím na výsledky hodnocení navrhuje opatření, která obsahují opravy nebo modernizaci stavby a jsou v souladu s účelem hodnocení pro zbytkovou životnost.

V některých případech se připouští různá opatření pro řízení rizik nebo snížení velikosti rizik. Mezi tato opatření patří omezení zatížení, změny způsobu využívání konstrukce, zavedení vhodného způsobu monitorování během provozu a kontrolního režimu [2].

2.2.2 Upřesnění postupu hodnocení pro kamenné stavby

Předběžné hodnocení

U konstrukcí z kamene je, vzhledem k jejich mnohaleté historii, nezdědka problém zajistit dostupnou projektovou dokumentaci a informace o předešlých úpravách. Pokud se však jedná o kamennou stavbu historicky významnou, lze její dokumentaci dohledat v některých institucích zabývajících se touto činností (archívy, kroniky) [15].

U kamenných konstrukcí je předběžná prohlídka velmi významná vzhledem k výše zmíněné problematice projektové dokumentace. Významným bodem prohlídky je určení typu horniny, z níž je konstrukce vybudována. Také její opracování a uložení, neboť toto všechno ovlivňuje funkčnost statického systému. Významné také mohou být pro hodnotitele kamenické značky, z nichž lze vyčíst, kdo konstrukci zřizoval a z těchto informací lze dedukovat i určité historické souvislosti [16].

Podrobné hodnocení

Při podrobné prohlídce kamenných staveb je nutné zaměřit se především na vizuální stav materiálu, vlhkost zdiva, konstrukční a mechanické vlastnosti, pevnost v tlaku a pevnost spojovacího materiálu. Hodnocení těchto vlastností kamene vyplývá ze zkoušek kamenného zdiva.

Vizuální stav materiálu

Základní vzhled kamene je charakterizován barvou, zrnitostí základních minerálů, prasklinami v minerálech, spárami mezi zrny, zhojenými a nezhojenými tektonickými poruchami. Je nutné počítat i s obvyklými odchylkami od základního vzhledu, jimiž mohou být shluky minerálů v hmotě, odchylky barevnosti, shluky zrn odlišné zrnitosti, póry, shluky tmavých minerálů ve světlé

hornině atd. Referenční vzorky kamene mohou být posouzeny dle metodiky uvedené v ČSN EN 1469 pro vizuální posouzení [17].

Vlhkost kamenného zdiva

Vlhkost je ovlivněna především druhem použitého kamene. Je potřebné stanovit původ a způsob pronikání vlhkosti a vody do konstrukce a určit rozsah sanačních opatření. K měření povrchové vlhkosti se používají nedestruktivní metody (měření elektrického odporu vlhkého zdiva, měření příložným kapacitním vlhkoměrem) [14].

Konstrukční a mechanické vlastnosti

Při prohlídce starších kamenných staveb je možné setkat se s problémy, které se nejčastěji týkají složení zdiva, neprovázanosti zdiva a nezaznamenaných stavebních zásahů.

Zejména u staveb větších průřezů nosných konstrukcí může být dokonalá vazba pouze v povrchové vrstvě a uvnitř je výplň v podobě směsi kamene prolité maltou nebo velkých dutin až kaveren. Velký vliv na mechanické vlastnosti mohou mít také stavební zásahy v minulosti. Vlivem rekonstrukcí mohlo dojít k narušení nosné konstrukce nebo oslabení jejího průřezu. Odstranění omítky může odhalit nedostatky v provázanosti zdiva v jedné či více vrstvách [18].

Kompletní složení zdiva se nejlépe vystihne pomocí jádrových vývrtů. Vyšetření rozměrů a stavu dutin se provádí endoskopem nebo boroskopem.

Průzkum trhlin je zaměřen na jejich šířku, délku a hloubku vzhledem k jednotlivým prvkům zdiva, ložným a styčným spárám a vzhledem k přilehlým konstrukcím. Aby bylo měření průkazné, mělo by se jednat o dlouhodobé monitorování trhlin (nejlépe minimálně jeden rok). Pro dlouhodobé sledování se k měření použije mechanických a strunových tenzometrů a pro krátkodobé měření je vhodnější odporový tenzometr.

Pro stanovení přítomnosti kovových částí či prutů se používají detektory výztuže (např. profometr). Díky němu je možné odhalit skryté kotevní prvky [14].

Pevnost v tlaku

Nasákavost, pórovitost a mrazuvzdornost ovlivňují pevnost zdiva v tlaku.

Při stanovení pevnosti v tlaku kamenných konstrukcí bývá využíváno destruktivních metod. Z konstrukce se odebírají jádrové vývrty, přičemž jejich velikost záleží na typu konstrukce i její historické významnosti [18]. Do staveb památkově chráněných lze viditelně zasahovat jen velmi omezeně. Z tohoto důvodu bývá ke stanovení pevnosti zdiva v tlaku také užito nedestruktivní

metody. Pomocí tvrdoměrné zkoušky se určí tvrdost a poté se pomocí korelačního vztahu určí pevnost. Tato metoda se nepoužívá příliš často, protože korelační vztahy pro kámen nejsou dostatečně výstižné [18].

Pevnost malty

Pro stanovení pevnosti malty v tlaku se využívá metod destruktivních, nedestruktivních i semidestruktivních. Pro nedestruktivní zkoušení bývá opět užito tvrdoměrné zkoušky nebo odhadu hloubky vrypu. Pro destruktivní metody je užito speciálně upravených příklepových vrtaček. U kamenných staveb je nejvhodnější využití destruktivní metody, ostatní metody nepřinášejí tolik průkazné výsledky. To je způsobeno nestejnorodostí malty v jedné vrstvě [18].

2.3 Stručný přehled metod zkoušení stavebního kamene

Norma ČSN 73 3251 uvádí jako významné vlastnosti přírodního kamene nasákavost, objemovou hmotnost a pevnost v prostém tlaku. Tyto vlastnosti jsou stanoveny a deklarovány dle příslušných norem [17].

2.3.1 Stanovení nasákavosti vodou za atmosférického tlaku

Metoda pro stanovení nasákavosti vodou přírodního kamene ponořením do vody za atmosférického tlaku je určena normou ČSN EN 13755. Podstatou metody je stanovení poměru hmotnosti vody nasáklé každým zkušebním tělesem během provádění zkoušky a hmotnosti vysušeného zkušebního tělesa vyjádřeného v procentech [19].

Zkušební tělesa

Zkušební tělesa musí mít tvar válce, krychle nebo hranolu (70 ± 5) mm nebo (50 ± 5) mm a musí být zhotovena vrtáním nebo diamantovým řezáním. Pokud jsou zkušební tělesa odebírána z homogenního vzorku, musí být jejich počet nejméně 6 ks.

Zkušební tělesa jsou vysušena při teplotě (70 ± 5) °C do ustálené hmotnosti, které je dosaženo, pokud rozdíl mezi dvěma váženími provedenými v rozmezí (24 ± 2) hodin není větší než 0,1 % z prvního ze dvou vážení [19].

Postup zkoušky

Zkušební tělesa jsou po vysušení zvážena s přesností 0,01 g, poté jsou vložena do nádoby s podpěrami v minimální vzdálenosti těles 15 mm a k nim je do nádoby vlita voda teploty (20 ± 10) °C. Voda se vlévá nejprve do poloviny výšky zkušebních těles, poté do tří čtvrtin jejich výšky, nakonec jsou tělesa úplně ponořena. Po úplném ponoření se tělesa v opakujících se intervalech vyjímají z vody, jsou otřena vlhkou látkou a zvážena s přesností na 0,01 g. Tyto hodnoty se zaznamenávají jako následující hmotnosti (m_i). Zkouška je dokončena dosažením ustálené hmotnosti.

Nasákavost vodou za atmosférického tlaku A_b každého zkušebního tělesa se vypočte podle vzorce:

$$A_b = \frac{m_s - m_d}{m_d} \cdot 100 ,$$

m_d je hmotnost vysušeného a m_s nasyceného zkušebního tělesa v gramech.

Výsledky se vyjádří s přesností na nejbližší 0,1 % [19].

2.3.2 Stanovení objemové hmotnosti

Metoda stanovení objemové hmotnosti je dána normou ČSN EN 1936. Podstatou zkoušky je stanovení objemové hmotnosti na základě hmotností zkušebních těles vysušených a nasycených vodou a vážení ponořených zkušebních těles [20].

Zkušební tělesa

Z bloku zkoušeného kamene musí být vybráno nejméně šest zkušebních těles.

Zkušební tělesa získané diamantovým řezáním nebo vrtáním musí mít tvar válce, krychle nebo hranolu. Poměr jejich plochy povrchu k objemu musí být v intervalu $<0,08 \text{ mm}^{-1}, 0,2 \text{ mm}^{-1}>$. Zkušební tělesa jsou vysušena při teplotě $(70 \pm 5) ^\circ\text{C}$ do ustálené hmotnosti, které je dosaženo, pokud rozdíl mezi dvěma váženími provedenými v rozmezí (24 ± 2) hodin není větší než 0,1 % z prvního ze dvou vážení [20].

Postup zkoušky

Každé zkušební těleso je po vysušení zváženo, poté se vkládá do vakuové nádoby, v níž je snížen tlak na $(2,0 \pm 0,5)$ kPa a tento tlak je udržen po dobu (24 ± 2) hodin. Následně se do nádoby pomalu vpustí demineralizovaná voda pokojové teploty a zkušební tělesa jsou ponechána v nádobě následujících (24 ± 2) hodin při působení atmosférického tlaku.

Poté je pro každé zkušební těleso stanovena hmotnost pod vodou m_h a hmotnost m_s nasyceného tělesa.

Pro přírodní kameny s viditelnými dutinami lze stanovit zdánlivý objem měřením rozměrů zkušebních těles na nejbližší milimetr.

Objemová hmotnost ρ_b v kilogramech na metr krychlový je vyjádřena vztahem:

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \cdot \rho_{rh}$$

m_d hmotnost vysušeného zkušebního tělesa (g)

m_h hmotnost zkušebního tělesa ponořeného do vody (g)

m_s hmotnost nasyceného zkušebního tělesa (g)

ρ_{rh} hustota vody ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) [20].

2.3.3 Stanovení pevnosti v prostém tlaku

Tato metoda se provádí v souladu s normou ČSN EN 1926.

Podstatou zkoušky je zatěžování zkušebního tělesa rovnoměrně rozloženým zatížením, které je plynule zvyšováno, dokud nedojde k porušení tělesa [21].

Zkušební tělesa

Zkoušeno by mělo být nejméně deset těles. Strany zkušebních těles by měly být hladké a prosté nerovností. Aby tělesa vyhověla rozměrovým požadavkům, měla by být dokončena na soustruhu či brusce a leštícím zařízením. Zkušební tělesa musí mít tvar krychle o hraně (70 ± 5) mm nebo (50 ± 5) mm nebo válce s kruhovým průřezem, jejichž průměr a výška se rovnají (70 ± 5) mm nebo (50 ± 5) mm. Zatěžování obvykle probíhá kolmo k plochám anisotropie (např. vrstevným plochám), ale může být realizováno i rovnoběžně s nimi.

Zkušební tělesa jsou vysušena při teplotě (70 ± 5) °C do ustálené hmotnosti [21].

Postup zkoušky

Pro krychlová tělesa je změřen postranní rozměr a pro válcová průměr zkušební tělesa s přesností na 0,1 mm. Výška zkušební tělesa je určena na nejbližší 1,0 mm.

Zkušební těleso je pečlivě vyrovnáno se středem tlačené plochy s kulovým uložením tak, aby bylo dosaženo jeho ustálené uložení.

Zkušební tělesa jsou zatěžována zkušebním lisem. Zatížení je na tělesa vytvářeno plynule s konstantní rychlostí napětí $(1 \pm 0,5)$ MPa/s. Pro nasycená tělesa se uplatňuje stejný postup zkoušky dle přílohy A normy [21].

Pevnost v prostém tlaku R ($N \cdot mm^{-2}$) je vyjádřena rovnicí:

$$R = \frac{F}{A}$$

F zatěžovací síla při porušení (N)

A plocha příčného průřezu zkušební tělesa před zkouškou (mm^2).

Výsledkem zkoušky je aritmetický průměr pevností \bar{R} , stanovený na nejbližší 1 MPa dle přílohy C normy [21]. Podle této přílohy se pro počet měření (n) a měřené hodnoty ($x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$) stanoví:

Aritmetický průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_i x_i$$

Směrodatná odchylka

$$s = \pm \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Variační součinitel

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \text{ (pro jednotlivé hodnoty) [21].}$$

2.4 Ultrazvuková metoda

Ultrazvuková metoda patří mezi elektroakustické nedestruktivní metody. Obecně je tato metoda popsána v normě ČSN 73 1371 [22] a specifiky stanovení rychlosti šíření zvuku přírodním kamenem v ČSN EN 14579 [23]. Ultrazvukovou metodu lze použít k určení fyzikálně-mechanických vlastností stavebních materiálů na základě odvození vztahu mezi rychlostí šíření ultrazvukových vln a těmito vlastnostmi [22].

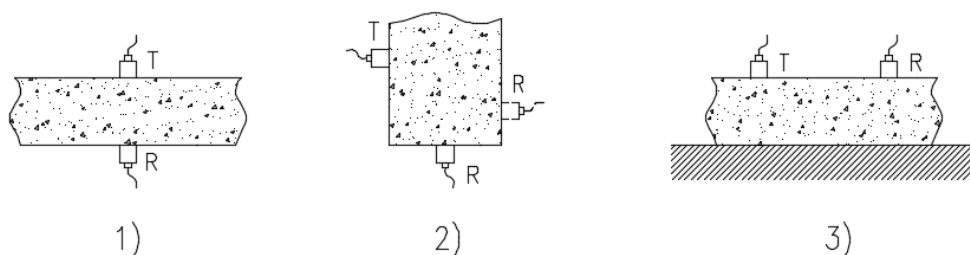
2.4.1 Obecný popis ultrazvukové metody

Podstatou této metody je opakované vyvolání impulsu podélného vlnění elektroakustickým budičem, umístěným na povrchu zkoušeného materiálu. Po průchodu dráhou známé délky L skrz zkoušený materiál je vibrační impuls přeměněn na elektrický signál druhým snímačem. Elektronický časový okruh umožňuje změřit dobu průchodu signálu [23]. Ultrazvukový kmitočet je určen jmenovitou hodnotou (dle konstrukce budiče), ve stavebnictví se běžně užívá hodnota 20 kHz – 150 kHz.

Měření rychlosti šíření ultrazvuku je prováděno sondami zkušebního přístroje, které obsahují elektroakustický měnič kmitočtu. Vždy jedna ze sond vysílá (budič) a druhá přijímá (snímač) ultrazvukové vlnění. Sondy mohou být piezoelektrické nebo magnetostrikční [24]. Způsob prozvučování je ovlivněn přístupností povrchu zkoušené konstrukce a umístěním sond na tomto povrchu. Dle rozmístění sond rozeznáváme prozvučování:

1. přímé – sondy jsou umístěny na protilehlých stěnách přímo naproti sobě, dráhu prozvučování lze snadno změřit;
2. polopřímé – sondy leží na sousedních stěnách objektu nebo leží na protilehlých stěnách ale ne přímo naproti sobě;
3. nepřímé – obě sondy leží na stejné straně objektu.

Jednotlivé způsoby prozvučování jsou znázorněny na obrázku 2.4.1-1, kde T je označen budič a R snímač [23].



Obrázek 2.4.1-1 Uspořádání snímačů pro stanovení rychlosti impulsu [23]

Mezi plochou každé sondy a měřeným materiálem musí být dosaženo odpovídající akustické spojení, u hladkých povrchů se jako kontaktní médium používá např. vazelína, mazlavé mýdlo apod.

Pro přímé a polopřímé prozvučování se rychlost šíření impulsu určí pomocí rovnice:

$$V = \frac{L}{T}$$

V rychlost impulsu (km/s)

L délka dráhy (mm)

T čas, za který impuls prošel dráhou L (μs)

Postup pro stanovení rychlosti šíření impulsu v případě nepřímého prozvučování je uveden v příloze A normy [23].

2.4.2 Měřicí přístroje

Přístroje pro provádění ultrazvukového měření jsou tvořeny generátorem elektrických impulsů, dvojicí sond, zesilovačem a elektrickým měřičem rychlosti.

Pro měření je možné použít dva typy elektronických časových zařízení:

- a) obrazovka – zobrazuje první část impulsu ve vhodném časovém měřítku;
- b) časový měřič – přímé čtení na číslicovém ukazateli.



Obrázek 2.4.2-1 Přístroj Proceq Pundit PL-200 [25]

Měřicí přístroj musí měřit průchozí doby na kalibračním vzorku s přesností $\pm 0,1 \mu s$ a musí být schopen zajistit ostrý náběh impulsu. Zařízení musí také zajistit, aby opakovací kmitočet byl dostatečně nízký, aby přijatý signál neobsahoval interference způsobené dozvuky [23].

2.4.3 Specifika určování rychlosti šíření zvuku přírodního kamene

Stanovení rychlosti šíření zvuku přírodním kamenem je zakotveno v normě [23], v níž, na rozdíl od normy [22], nejsou uvedeny vztahy pro přesné stanovení mechanických vlastností kamene.

Zkušební tělesa

Pokud jsou zkušební tělesa odebírána z homogenního vzorku, musí být jejich počet nejméně 6 ks. Zkušební tělesa by měla mít tvar hranolu o rozměrech 300 mm × 75 mm × 50 mm a měla by být standardně řezaná nebo broušená.

Pokud se v tělesech vyskytují plochy anisotropie (např. vrstevnatost), zkušební tělesa jsou zhotovena tak, aby dlouhá osa směřovala rovnoběžně nebo kolmo k těmto plochám.

Zkušební tělesa jsou vysušena při teplotě $(70 \pm 5) ^\circ\text{C}$ do ustálené hmotnosti, které je dosaženo, pokud rozdíl mezi dvěma váženími provedenými v rozmezí (24 ± 2) hodin není větší než 0,1 % z prvního ze dvou vážení [23].

Faktory ovlivňující rychlost zvuku

Obsah vody

Obsah vody má velký vliv na rychlost šíření zvuku tělesem. Nasycená tělesa mohou vykazovat až o 50 % nižší rychlost než vysušená. Tento vliv musí být zohledněn při stanovení konečné korelace pomocí kalibračních křivek [23].

Délka dráhy

Délka dráhy měřeného tělesa musí být dostatečně dlouhá, aby na ni nepůsobil vliv heterogenity kamene. Tabulka B.1 přílohy B normy [23], která je platná pro maximální délku dráhy 15 m, poukazuje na vliv délky dráhy na rychlost šíření impulsů.

Rychlost není ovlivněna změnami délky dráhy. U měřících přístrojů často dochází k vykazování slabého poklesu rychlosti po délce dráhy. Tato odchylka je způsobena větší mírou vymizení složky signálu s vysokým kmitočtem oproti složce s nízkým kmitočtem.

Tvar a rozměry zkušebních těles

Pokles rychlosti je vázaný na poměr vlnové délky impulsu a nejmenšího postranního rozměru zkušební tělesa, pokud je ovšem poměr menší než jedna, pokles se zanedbává.

Vliv všech rozměrů zkušebního tělesa na rychlost šíření impulsů je uveden v tabulce B.1 přílohy B normy [23].

V případě prozvučování kamenných prvků s výrazně odlišnými rozměry se používá přístroj pro nepřímé prozvučování nebo je změněn způsob prozvučování.

Trhliny a póry

Množství energie ultrazvukového signálu, procházejícího horninou, je při dosažení rozhraní vzduch-hornina zanedbatelné. Pokud je délka póru větší než rozměr sond a použitá vlnová délka, znamenají póry pro ultrazvukový paprsek překážku. To způsobuje zalomení prvního impulsu detekovaným snímačem na rozhraní anomálie a vzniká další dráha prozvučování v kameni bez trhlina pórů.

U rozpraskaného kamene svisle zatížené konstrukce prochází ultrazvuk napříč trhlinami bez porušení. U trhlín vyplněných kapalinou, která přenáší ultrazvukovou energii, nedojde k jejich projevení při použití časového měřiče s přímým čtením na číslicovém ukazateli.

3 PRAKTICKÁ ČÁST

3.1 Hodnocení kamenných sloupů zámku Bučovice

Cílem této kapitoly je vyhodnocení naměřených údajů a vizuální prohlídky objektu. Objektem měření byly poškozené sloupy zámku Bučovice. Při předběžné prohlídce byly vybrány jednotlivé sloupy, které byly zdokumentovány a následně změřeny nedestruktivní metodou.

3.1.1 Stručné informace o objektu

Zámek Bučovice se nachází ve městě Bučovice, které se nachází 30 km východně od Brna v okrese Vyškov v Jihomoravském kraji [26].



Obrázek 3.1.1-1 Přední pohled na zámek [27]



Obrázek 3.1.1-2 Pohled na zámek ze zahrady [28]

Bučovický zámek je renesanční stavbou, která je unikátní svou italskou podobou, kterou jí vtiskl projektant Jacopo de Strada. Stavbu si objednal a nechal postavit tehdejší majitel bučovického panství, Jan Šembera Černoohorský z Boskovic, v letech 1567-1582. Jedná se o rozsáhlý komplex, zahrnující renesanční zahradu, hradební zdi a vodní příkop. Čtyřkřídlý zámek má arkádové nádvoří, na němž je na třech patrech objektu umístěno 90 pískovcových sloupů s celkem 540 reliéfy, vyobrazujícími válečné motivy, erby, rostliny, fantastická zvířata a bytosti, maskarony a hudební nástroje. Sloupy ozdobili italští kameníci Elia Canavale a Antonio Silva [29].



Obrázek 3.1.1-3 Pohled na arkády

Od roku 1681 se stal zámek administrativním centrem a do roku 1945 patřil zámek i s panstvím rodu Lichtenštejnů. V současnosti je zámek ve správě Národního památkového ústavu (územní památková správa Kroměříž) a je zpřístupněn veřejnosti v podobě vedených prohlídek nebo možnosti soukromého pronájmu jeho prostor [29].

3.1.2 Označení a popis měřených sloupů

Při prvotní prohlídce byly sloupky pro toto měření označeny pomocí dvojice čísel. První z čísel vyjadřuje pořadí podlaží, ve kterém se sloup nachází a číslo za pomlčkou značí číslo sloupu. Číslo sloupu bylo stanoveno vzhledem k světovým stranám, vždy od severní strany objektu přes západní k jižní. Přehledné označení je vyobrazeno na následujících obrázcích. Lze říci, že na těchto fotkách čísla sloupů rostou vždy zprava doleva.



Obrázek 3.1.2-1 Číslování sloupů na severní straně objektu



Obrázek 3.1.2-2 Číslování sloupů na západní straně objektu – pravá část



Obrázek 3.1.2-3 Číslování sloupů na západní straně objektu – levá část



Obrázek 3.1.2-4 Číslování sloupů na jižní straně objektu

Při prohlídce byly vybrány sloupy vhodné k měření. Jednalo se zejména o sloupy s viditelným poškozením, s odloupávající se svrchní vrstvou, sloupy s již provedenými konstrukčními opatřeními (obruče, záplaty). Vyšetřovány byly i sloupy uspokojivého vzhledu pro porovnání s poškozenými sloupy. Celkem bylo posuzováno 12 sloupů. Nejvíce hodnocených sloupů bylo ve třetím poschodí – 8 sloupů. V druhém poschodí byly zkoumány 4 sloupy a v prvním nadzemním podlaží nebyl zkoumán ani jeden, protože při vizuální prohlídce na nich nebyly shledány viditelné vady. Přesný stav vybraných sloupů je popsán ve vyhodnocení měření v kapitole 3.1.4.

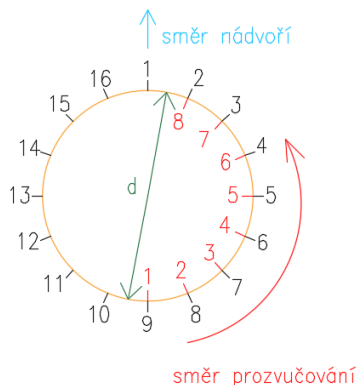
Všechny sloupy jsou vyrobeny z drobového pískovce jemného až středně zrnitého. Vzhledem k tomu, že pískovec je sedimentární hornina vrstevnaté struktury, jsou jeho mechanické vlastnosti ovlivněny polohou ploch vrstevnatosti vůči směru působícího zatížení. U sloupu, jakožto prvku s převládajícím výškovým rozměrem nad půdorysným, je žádoucí, aby plochy vrstevnatosti byly rovnoběžné s osou sloupu. Toto splňují všechny měřené sloupy, vyjma sloupu 3-7, jehož plochy vrstevnatosti leží vzhledem k ose sloupu pod ostrým úhlem.

3.1.3 Postup hodnocení

Vzhledem k tomu, že zámek Bučovice je kulturní památkou, bylo ke stanovení kvality pískovce a vnitřních nehomogenit užito nedestruktivní ultrazvukové impulsní metody. Ke stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu byl použit přístroj Pundit PL-200 a byly zvoleny sondy frekvence 54 kHz a 150kHz.

Měření probíhalo po obvodu sloupu ve zvolené výšce, měřené od horní hrany zábradlí, které lícuje se soklem sloupu. Dráha prozvučování byla rovna průměru sloupu. Délkové parametry byly zaznamenány pomocí svinovacího metru a posuvného měřidla.

Prozvučování bylo přímé a bylo realizováno v délce obvodu průřezu pomyslně rozděleném na 8 základen, jimž odpovídá 16 oddílů. Měření začínalo vždy kolmo směrem do nádvoří a postupovalo proti směru hodinových ručiček.



Obrázek 3.1.3-1 Schéma prozvučování sloupu o průměru d po obvodu rozděleném na 8 základen a 16 oddílů

3.1.4 Detailní rozbor vybraných sloupů

U každého sloupu jsou uvedeny rozměry průřezu (průměr, obvod), výška, ve které se průřez nachází a fotodokumentace zaměřená na celkový vzhled a detaily vad a nedostatků.

Dále je uvedeno grafické zpracování naměřených hodnot. V prvním grafu jsou vždy vyneseny naměřené hodnoty v jednotlivých základnách v závislosti na vzdálenosti základů. Druhým grafem je paprskový graf, znázorňující procentuální relativní pokles rychlosti šíření ultrazvuku v osmi základnách, rozdělených na šestnáct oddílů. Graf slouží jako vizualizace naměřených hodnot, která svědčí o míře narušení. Tento graf ovšem neodpovídá hloubce narušení. Vzhledem k tomu, že sloup má kruhový průřez a lze ho zkoumat pouze v radiálním směru, jsou grafy značně idealizované na základně maximální naměřené hodnoty. Část sloupu, v níž nelze s určitostí stanovit hodnoty, uvažujeme dle maximální hodnoty jako plnou.

Pro detailní popis byly vybrány sloupy 2-8, 3-5, 3-7 a 3-18. Výsledky měření ostatních sloupů jsou kvůli zachování plynulosti textu uvedeny v příloze č. 1.

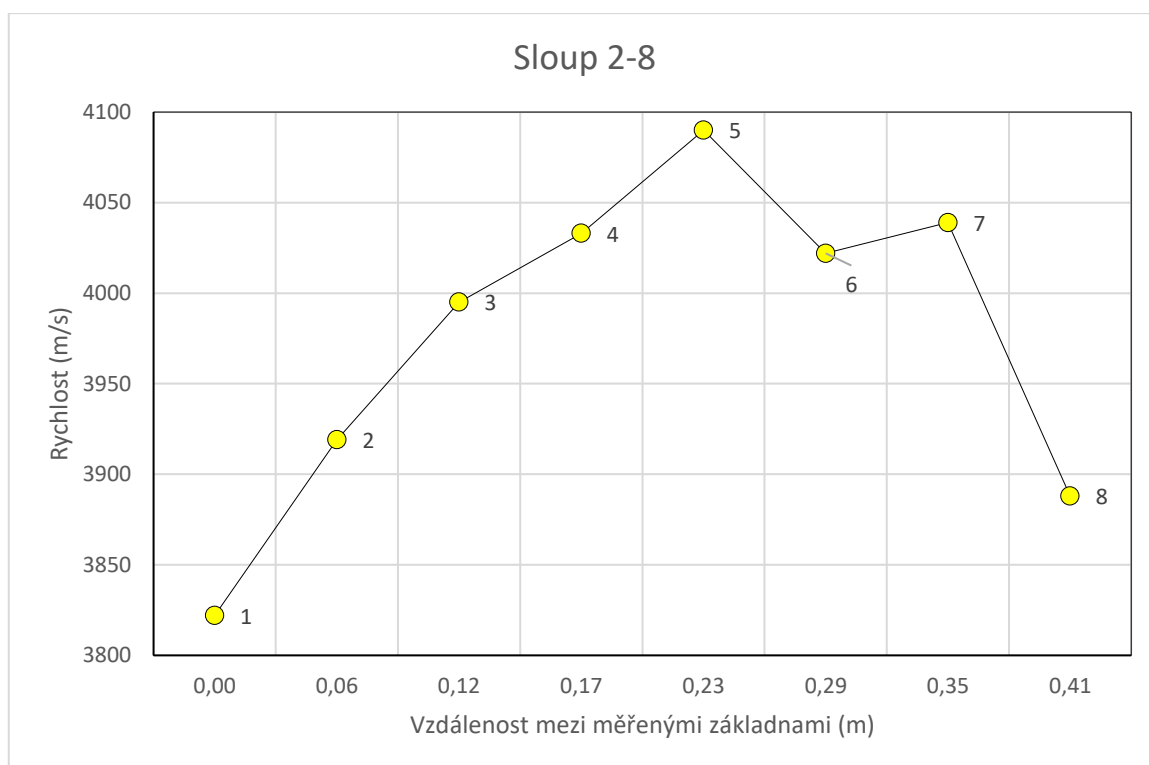
Sloup 2-8

Měřen byl průřez ve výšce 620 mm od horní úrovně zábradlí, v tomto místě měl sloup průměr 292 mm a obvod 930 mm. Sloup se nachází ve druhém poschodí na severní straně stavby. Byl ve velmi dobrém vizuálním stavu, pata sloupu byla mírně narušená.

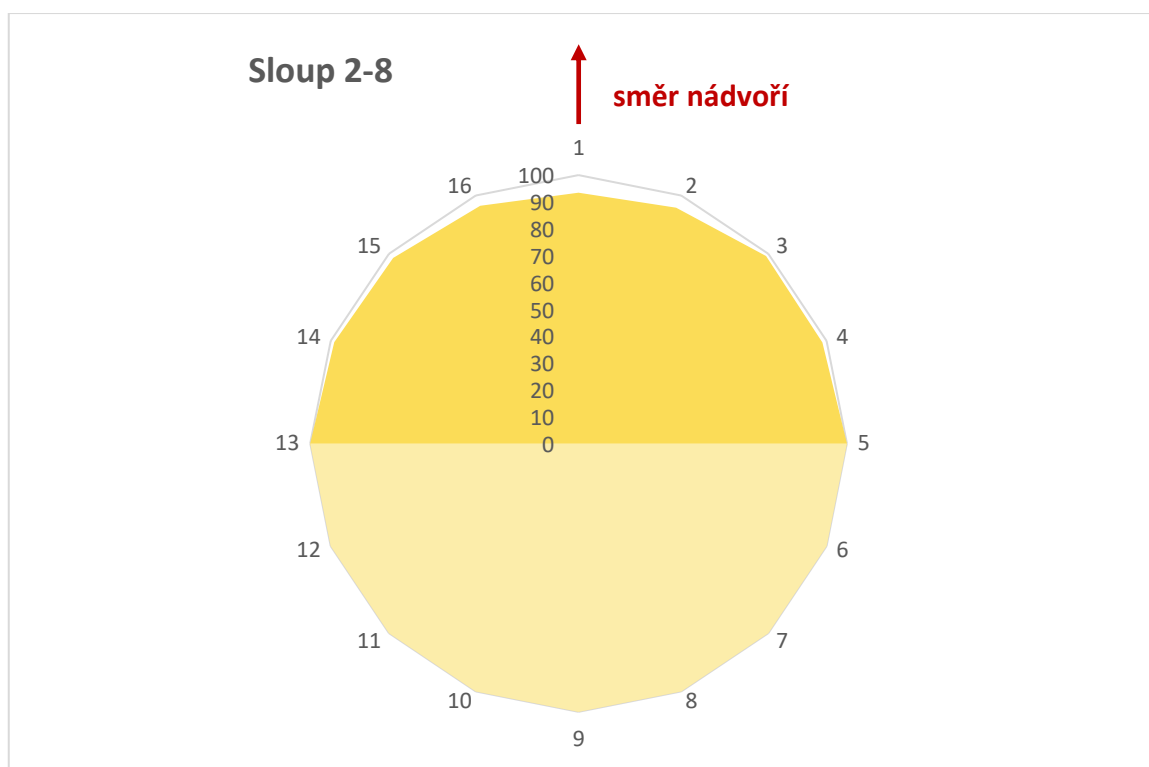
Tento sloup byl vybrán k podrobnějšímu popisu, protože jeho naměřené hodnoty vykazovaly nejmenší rozptyl. Vzhledem k tomu, že nejvyšší naměřená rychlost byla vyšší než průměrná rychlost všech maximálních rychlostí sloupů, lze jeho stav považovat za optimální.



Obrázek 3.1.4-1 Fotografie měřeného úseku sloupu 2-8 [30]



Graf 3.1.4-1 Sloup 2-8: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách



Graf 3.1.4-2 Sloup 2-8: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření ultrazvuku

Maximální rychlost $v = 4\,090\text{ m/s}$ byla naměřena v oddílu 5-13. Hodnoty rychlostí klesají po obvodu sloupu směrem do nádvoří v oddílu 6-14 až 1-9, kde se nachází nejmenší naměřená hodnota úseku $v = 3\,822\text{ m/s}$ a od tohoto oddílu hodnoty opět rostou.

Sloup 3-5

Sloup byl měřen ve dvou úrovních označených jako dolní úsek (3-5.1) a horní úsek (3-5.2). Sloup se nachází na severní straně objektu ve třetím poschodí. Tento sloup byl k podrobnějšímu popisu vybrán kvůli velkému množství odlupujících se vrstev, a také protože na sloupu byly v minulosti již provedeny konstrukční úpravy v podobě kovových obručí, které měly za cíl sloup zpevnit a zvýšit jeho tuhost.



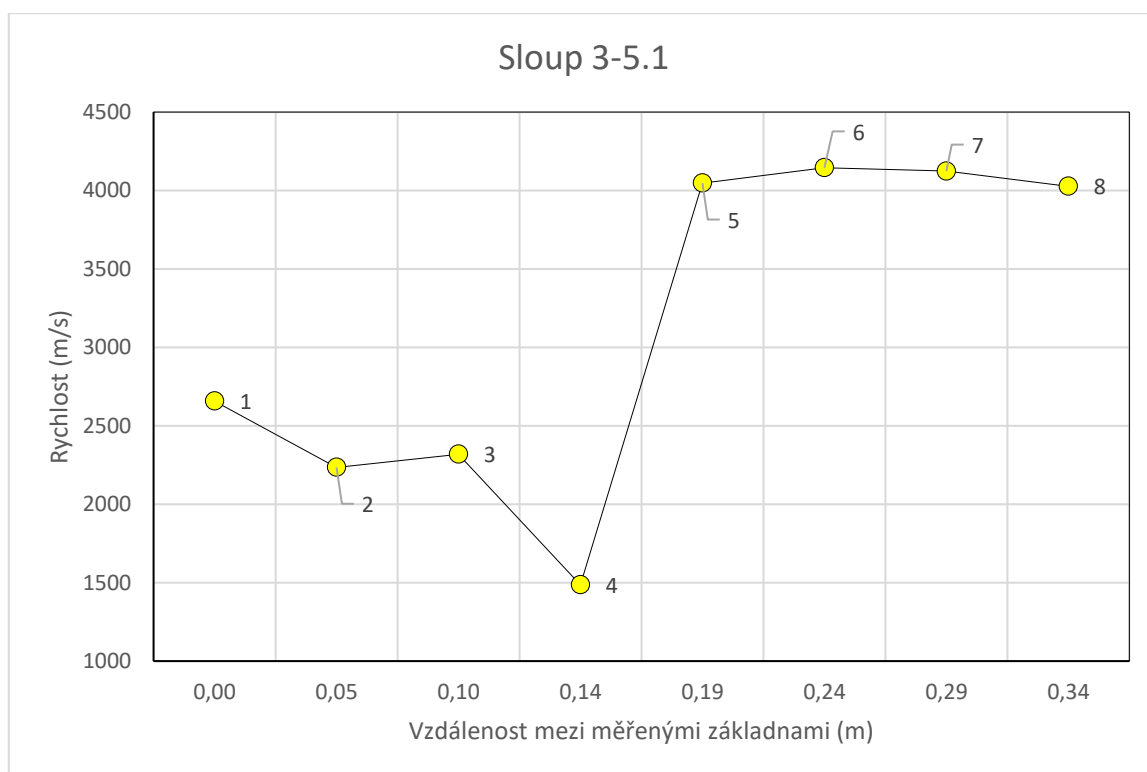
Obrázek 3.1.4-2 Fotografie sloupu 3-5



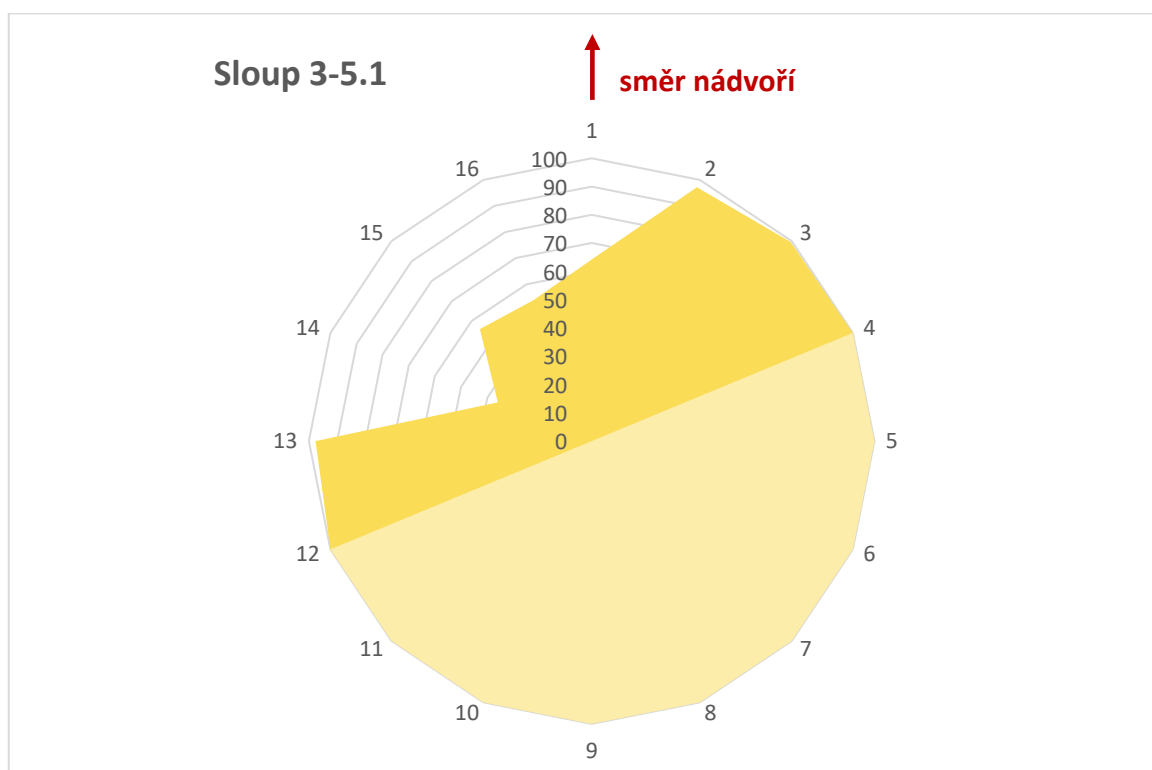
Obrázek 3.1.4-3 Detail horního úseku sloupu 3-5 [30]

Dolní úsek

Byl měřen průřez ve výšce 330 mm od horní hrany úrovně zábradlí, v tomto místě měl sloup průměr 240 mm a obvod 770 mm. Tento úsek se nacházel v úrovni pod poslední obručí (čtvrtou shora). V dolní části byly viditelné trhliny povrchové vrstvy. V tomto úseku byla naměřena nejmenší hodnota rychlosti ze všech sloupů $v = 1\,486\text{ m/s}$.



Graf 3.1.4-3 Sloup 3-5.1: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách



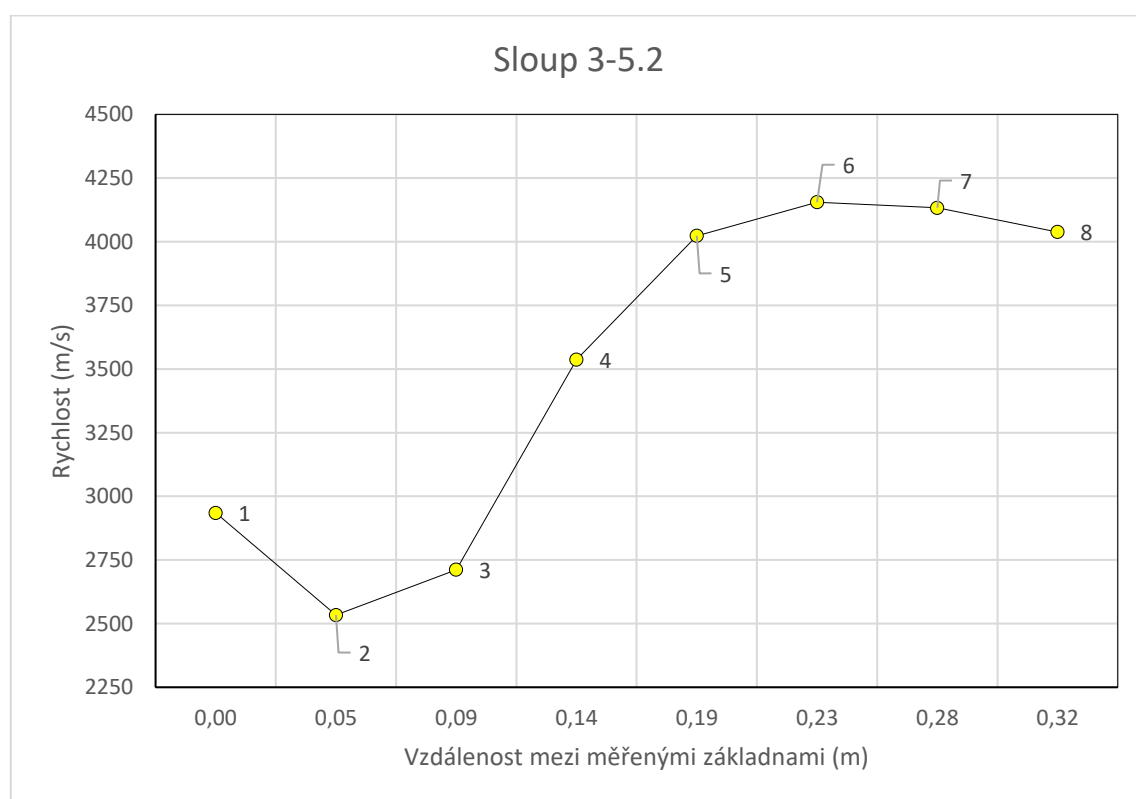
Graf 3.1.4-4 Sloup 3-5.1: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření ultrazvuku

Oproti oddílu 5-13 došlo v 6-14 k prudkému poklesu rychlostí na hodnotu $v = 1486$ m/s. Takto velký pokles rychlosti značí významné poškození povrchových vrstev v těchto místech.

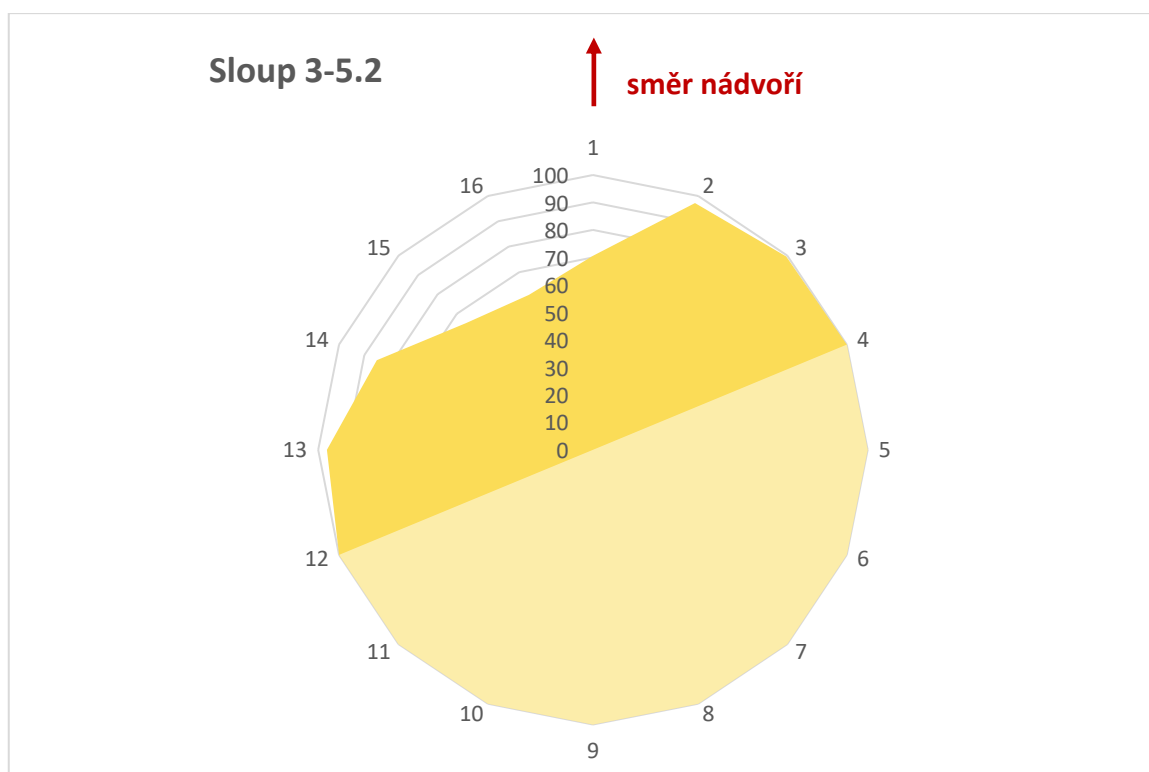
Od tohoto oddílu zůstaly rychlosti až k oddílu 1-9 pod hranicí 3 000 m/s. Úsek 2-10 již vykazuje téměř maximální rychlost průřezu. Na obrázku 3.1.2-2 je patrné, že v místě největšího poklesu rychlosti se nachází prasklina povrchové vrstvy.

Horní úsek

Byl měřen průřez ve výšce 1 450 mm od horní hrany úrovně zábradlí, v tomto místě měl sloup průměr 228 mm a obvod 740 mm. Tento úsek se nacházel v úrovni mezi druhou a třetí obručí (seshora). V horní části sloupu byl povrch popraskaný a některé vrstvy byly ve stavu před odloučením.



Graf 3.1.4-5 Sloup 3-5.2: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách



Graf 3.1.4-6 Sloup 3-5.2: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření ultrazvuku

Horní úsek vykazoval téměř stejnou maximální rychlost jako dolní úsek ($v = 4\,155\text{ m/s}$ v oddílu 4-12). Stejně jako v dolním úseku byly nejnižší hodnoty naměřené ve druhém kvadrantu sloupu. Od oddílu 5-13 rychlost klesala až do 8-16, kde byla stanovena minimální rychlost $v = 2\,532\text{ m/s}$.

Sloup 3-7

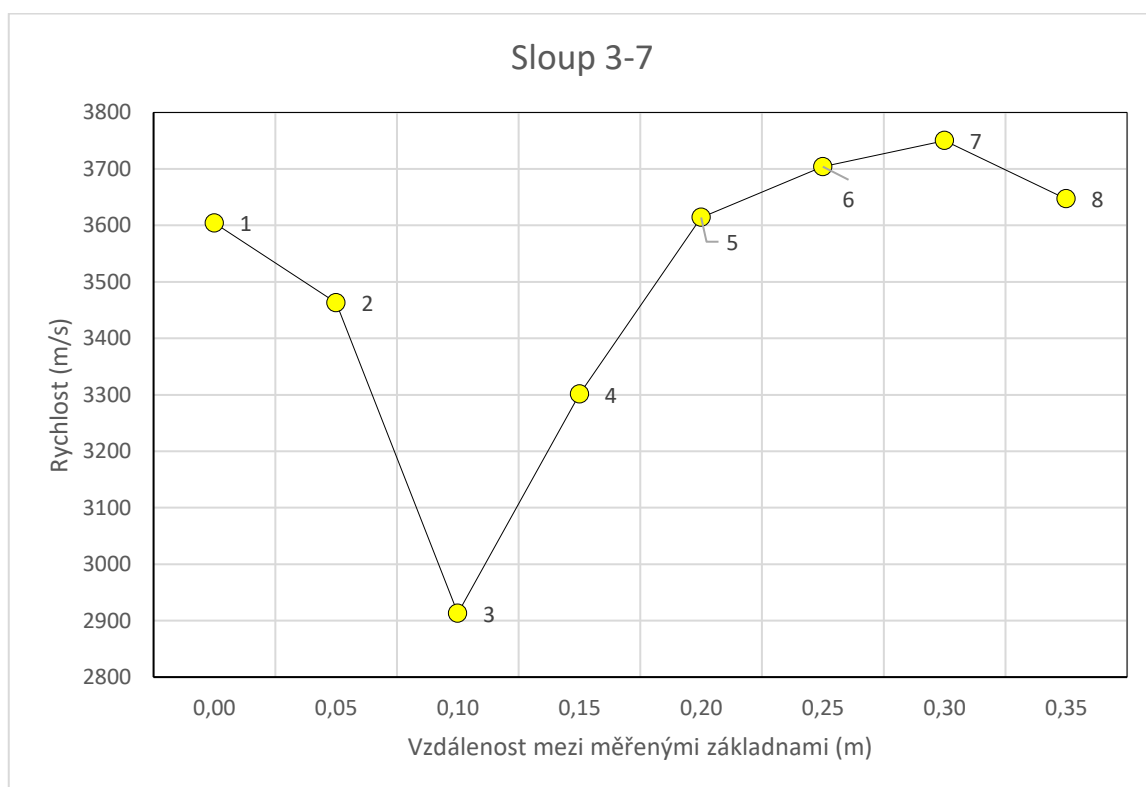
Byl měřen průřez ve výšce 670 mm od horní hrany úrovně zábradlí, v tomto místě měl sloup průměr 255 mm a obvod 800 mm. Sloup se nachází ve třetím poschodí na severní straně stavby. Tento sloup byl k popisu vybrán, protože, na rozdíl od ostatních sloupů, nejsou jeho plochy vrstevnatosti rovnoběžné s osou sloupu, ale svírají s ní ostrý úhel. Tento fakt se projevil naměřením výrazně nižších hodnot rychlostí šíření ultrazvuku v porovnání s ostatními sloupy.



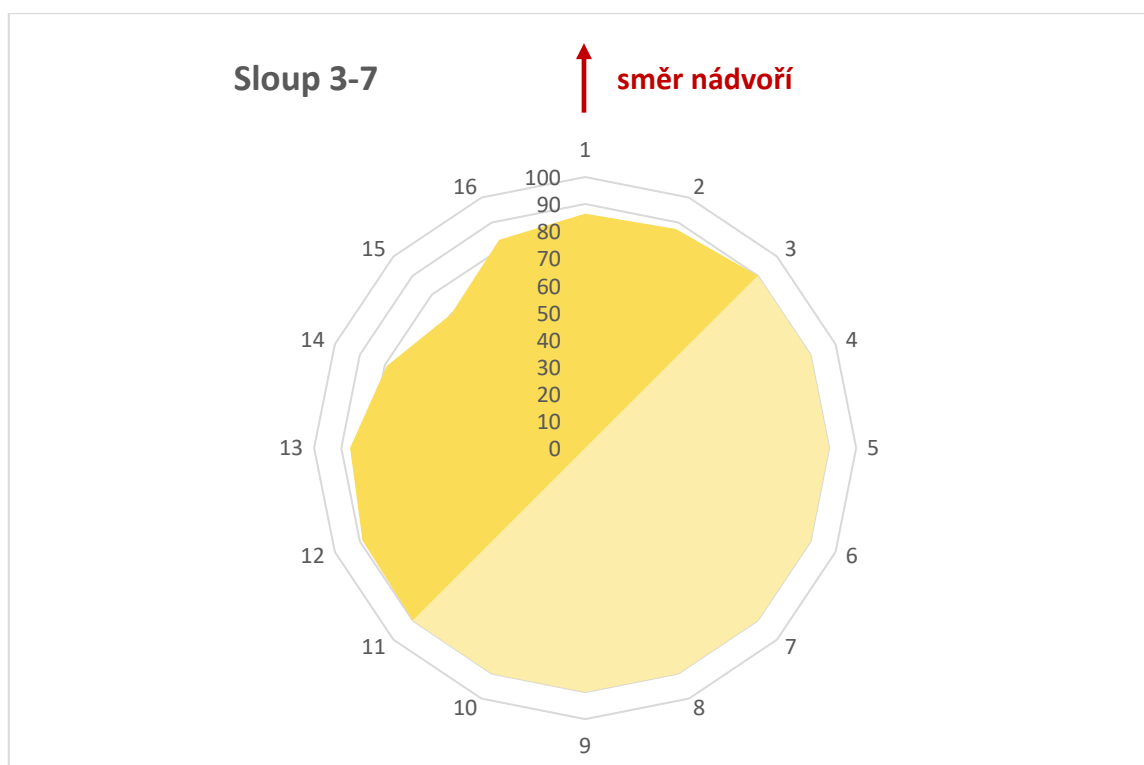
Obrázek 3.1.4-4 Fotografie sloupu 3-7 [30]



Obrázek 3.1.4-5 Detail ploch vrstevnatosti sloupu 3-7 [30]



Graf 3.1.4-7 Sloup 3-7: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách



Graf 3.1.4-8 Sloup 3-7: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření ultrazvuku

V tomto případě graf 3.1.4-8 zobrazuje procentuální relativní pokles rychlostí šíření zvuku sloupu 3-7 vůči průměru maximálních hodnot jednotlivých sloupů dosažených v jejich neporušené části. Maximální rychlost $v = 3\,750$ m/s, odpovídající oddílu 3-11, naměřená v tomto sloupu je výrazně nižší než průměrná hodnota maximálních rychlostí ostatních sloupů $v = 4\,167$ m/s. Nejnížší naměřená rychlost $v = 2\,913$ m/s je v oddílu 7-15.

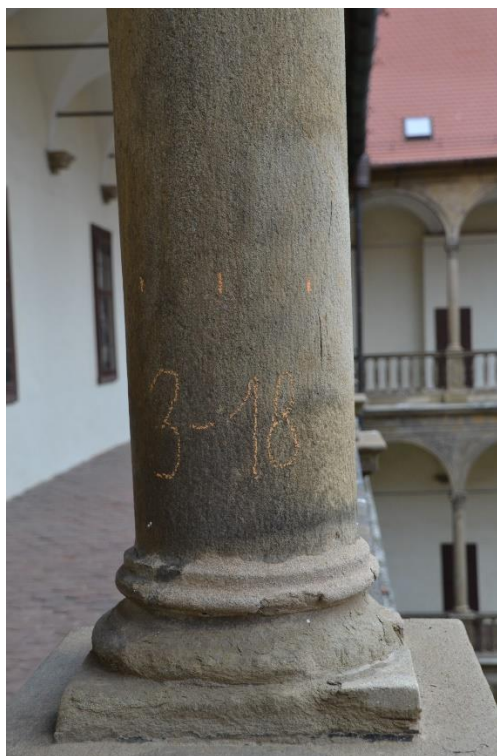
Cílem tohoto grafu je vyjádření rozdílu průměru maximálních hodnot neporušených částí ostatních sloupů, jejichž plochy vrstevnatosti jsou rovnoběžné s osou sloupu, a změřených hodnot sloupu 3-7, jenž má plochu vrstevnatosti v ostrém úhlu k ose sloupu.

Sloup 3-18

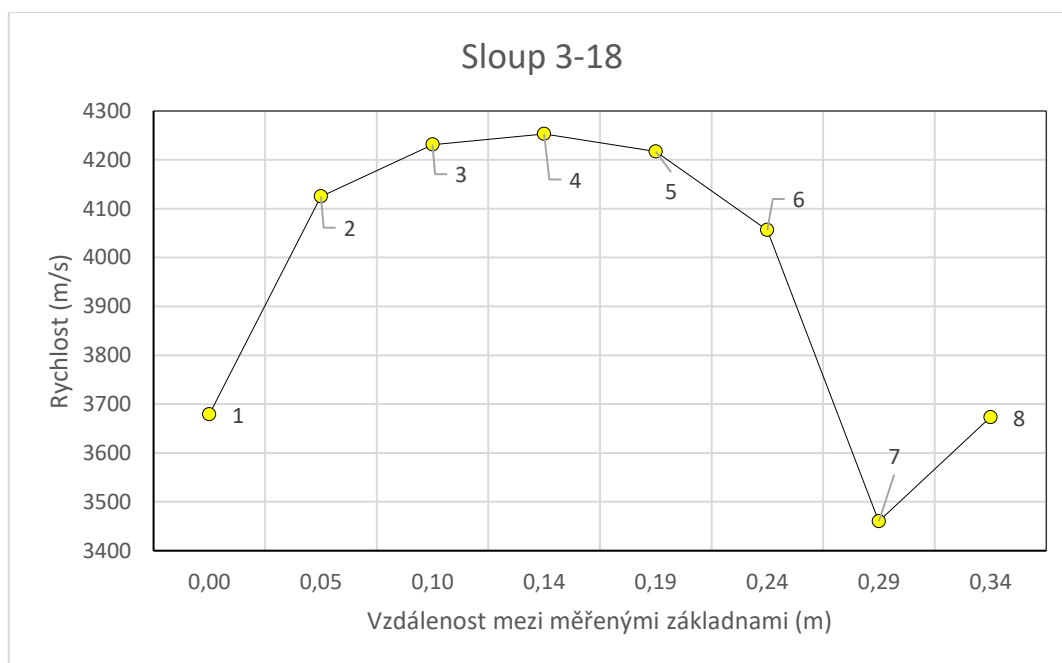
Byl měřen průřez ve výšce 440 mm od horní hrany úrovně zábradlí, v tomto místě měl sloup průměr 245 mm a obvod 770 mm. Sloup leží na západní části objektu ve třetím poschodí. Tento sloup byl k podrobnému popisu vybrán jako příklad běžného průběhu rychlostí šíření zvuku sloupem. Na jeho povrchu je patrné drobné porušení svrchní vrstvy, pata sloupu je mírně rozrušená.



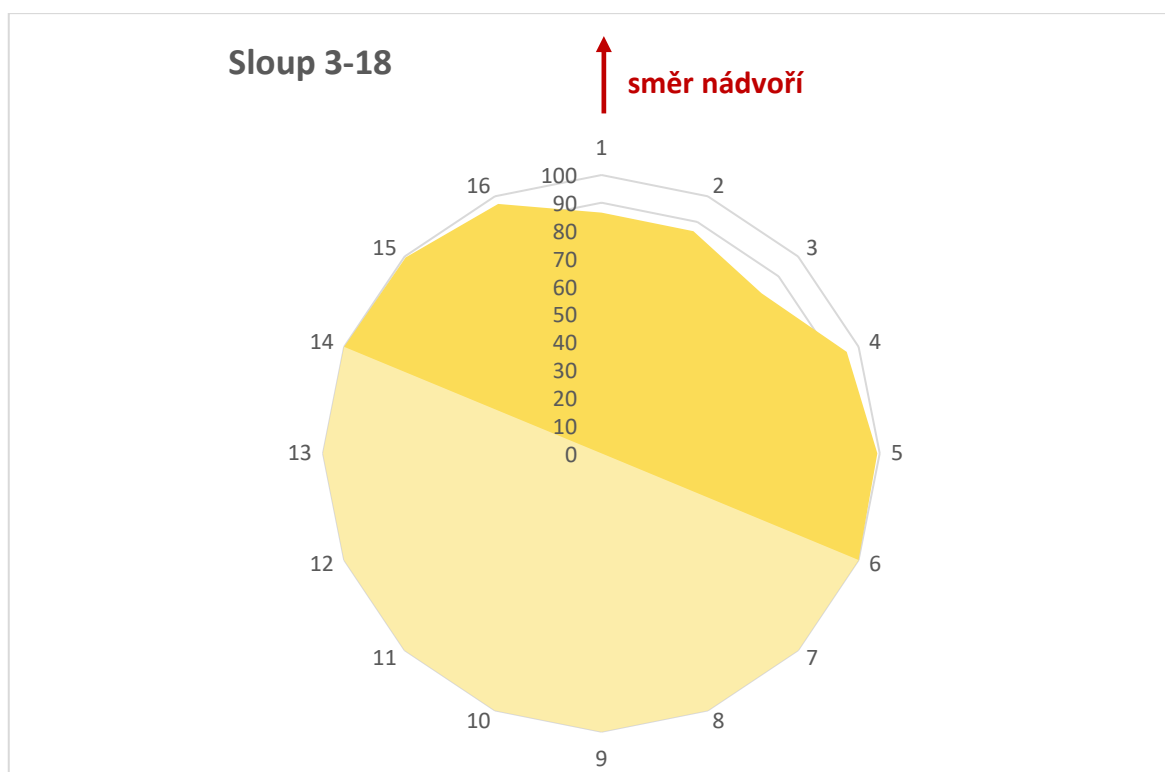
Obrázek 3.1.4-6 Fotografie sloupu 3-18 [30]



Obrázek 3.1.4-7 Fotografie detailu měřeného úseku sloupu 3-18 [30]



Graf 3.1.4-9 Sloup 3-18: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách



Graf 3.1.4-10 Sloup 3-18: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření ultrazvuku

Největší dosažená rychlost $v = 4\,253\text{ m/s}$ průřezu odpovídá oddílu 6-14. V oddílech 7-15 a 5-13 jsou průřezy téměř plné a v oddílech 1-9 a 2-10 je dosaženo téměř stejných hodnot. Nejnižší hodnota rychlosti $v = 3\,460\text{ m/s}$ odpovídá úseku 3-11.

3.1.5 Výsledky

Z průměrné hodnoty maximálních rychlostí $v = 4\,167\text{ m/s}$ neporušených částí všech sloupů, jejichž plochy vrstevnatosti jsou rovnoběžné s osou sloupu, vyplývá, že tuto hodnotu lze použít jako orientační bod pro porovnání ostatních naměřených hodnot.

Byla porovnána průměrná hodnota se souborem všech naměřených hodnot a základě tohoto byly stanoveny následující podmínky pro posouzení výsledků:

1. Měřené body, v nichž bylo dosaženo rychlosti $v \geq 3\,800\text{ m/s}$ (pokles rychlosti do 10 % průměrné hodnoty), jsou ve výborném stavu. Povrchová vrstva sloupu není v těchto bodech porušená.
2. Hodnoty rychlostí měřených bodů jsou v intervalu $3\,800\text{ m/s} \geq v > 3\,000\text{ m/s}$ (pokles rychlosti větší než 10 % průměrné hodnoty). Porušení povrchových vrstev sloupu, v místě měřených bodů, je mírné.

3. Povrchová vrstva sloupů je v místě měřených bodů, v nichž byla stanovena rychlost $v < 3\,000\text{ m/s}$, vážně porušená (pokles rychlosti o více než 30 %).

Dle těchto kritérií jsou změřené rychlosti v grafu 3.1.5-1 a 3.1.5-2 barevně odlišeny pro lepší orientaci ve výsledcích. Zeleně jsou označeny hodnoty splňující podmínku č.1, oranžově hodnoty splňující podmínku č.2 a červeně hodnoty splňující podmínku č.3.

Tabulka 3.1.5-1 Souhrn všech naměřených hodnot

Označení základny	Označení sloupu							
	2-8	2-11	2-21	2-22	3-5.1	3-5.2	3-7	3-10
	Rychlost šíření ultrazvuku sloupem (m/s)							
9-1	3 822	3 570	4 038	3 937	2 658	2 935	3 604	3 394
8-16	3 919	3 817	4 167	3 875	2 235	2 534	3 463	3 315
7-15	3 995	3 962	4 127	3 880	2 319	2 712	2 913	3 833
6-14	4 033	4 050	4 144	3 498	1 486	3 537	3 301	4 175
5-13	4 090	3 322	4 043	3 275	4 047	4 023	3 614	4 241
4-12	4 022	3 925	3 851	2 924	4 145	4 155	3 704	4 324
3-11	4 039	4 118	2 947	3 860	4 124	4 133	3 750	4 226
2-10	3 888	3 962	3 745	3 816	4 027	4 038	3 647	3 945

Tabulka 3.1.5-2 Souhrn všech naměřených hodnot

Označení základny	Označení sloupu						
	3-11	3-14.1	3-14.2	3-18	3-21.1	3-21.2	3-31
	Rychlost šíření ultrazvuku sloupem (m/s)						
9-1	3 605	3 954	4 076	3 679	3 687	2 489	4 220
8-16	2 210	4 144	4 144	4 125	3 255	2 215	4 286
7-15	3 054	4 238	4 221	4 231	3 343	2 230	4 156
6-14	3 887	4 246	4 159	4 253	3 670	2 696	3 939
5-13	4 120	4 130	4 106	4 217	3 813	2 859	3 802
4-12	4 291	3 954	4 151	4 056	3 920	3 815	3 174
3-11	4 269	3 866	4 054	3 460	4 083	4 018	3 349
2-10	4 072	3 860	3 954	3 673	3 933	4 004	3 876

Nejnižší rychlosti vykazoval sloup 3-5 v obou úsecích a sloup 3-21. Ve sloupu 3-7 byly naměřeny nižší hodnoty ve všech základnách oproti ostatním sloupům (ovlivněno uspořádáním ploch vrstevnatosti vůči ose sloupu). Naopak nejlepší výsledky vykazují sloupy 2-8 a 3-14.

3.1.6 Shrnutí

Vzhledem k tomu, že sloupy mají kruhový průřez, nebylo možné na základě ultrazvukové metody stanovit přesnou hloubku porušení. Kruhový průřez bylo možné prozvučovat pouze radiálně. I z takto získaných hodnot ale vyplývá, že porušení probíhá tangenciálně s osou sloupu. Tento fakt svědčí o tom, že porušení je pouze v povrchových vrstvách.

Způsob porušování v těchto vrstvách je ovlivněn strukturou pískovce, jenž je vrstevnatou usazenou horninou. V plochách vrstevnatosti sloupu dochází k pnutí, což vede k odlučování materiálu rovnoběžně s těmito plochami. Sloup 3-7 je jediným měřeným sloupem, jenž byl zhotoven z kusu kamene tak, že ve výsledku osa sloupu není rovnoběžná s osou vrstevnatosti horniny. Ostatní měřené sloupy byly vyrobeny tak, aby plochy vrstevnatosti byly rovnoběžné s osou sloupu. Půdorysná orientace ploch vrstevnatosti sloupu vůči nádvoří ovlivňuje, v jaké části sloupu dochází k porušení povrchových vrstev. Na všech stranách objektu byla míra porušení sloupů víceméně stejná, takže lze říci, že narušení nesouvisí s orientací objektu vůči světovým stranám.

Vzhledem k tomu, že porušení sloupů je orientováno vždy směrem do nádvoří, je zřejmé, že je způsobeno povětrnostními vlivy. Mezi povětrnostní vlivy nejvíce ovlivňující stav kamenné konstrukce patří teplota, s níž souvisí teplotní roztažnost materiálu, působení mrazu a vody na konstrukci. Z těchto vlivů budou mít zřejmě na míru degradace největší vliv změny teplot a intenzita slunečního záření. Sloupy jsou vystaveny změnám teplot vlivem neustále se střídajících ročních cyklů (zima, léto). Vnější strana sloupu (část směřující do nádvoří) je vystavována neustále se střídajícím cyklům osluňování (den, noc), při nichž dochází k lokální změně teploty v části, která je vystavena slunečnímu záření. Při tomto cyklu dochází vlivem teplotní roztažnosti materiálu k nepatrným objemovým změnám v osluňované části, které vyvolávají pnutí v plochách vrstevnatosti. Při neustálém opakování těchto cyklů dochází k únavě materiálu, vedoucí až k jeho porušení právě v těchto vrstvách.

Vliv vody na degradaci sloupů je značně omezen zastřešením sloupů. Je předpokládáno, že vliv vody působící na konstrukci je spíše menší, neboť u nepoškozených sloupů nejspíše nedochází k takové míře nasycení vodou, aby se podílela na degradaci sloupu. Vliv nasycení spíše přispívá spolu s cykly zmrazování a rozmrazování k odlupování vrstev, již porušených způsobem uvedeným v předešlém odstavci.

3.2 Laboratorní měření

Pro zpřesnění a lepší interpretaci výsledků dosažených na konstrukci bylo provedeno laboratorní měření na podobném materiálu, konkrétně na hořickém pískovci. Měření ukázalo, že vlastnosti tohoto pískovce byly poněkud odlišné a jeho kvalita byla nižší než u pískovce na zámku v Bučovicích.

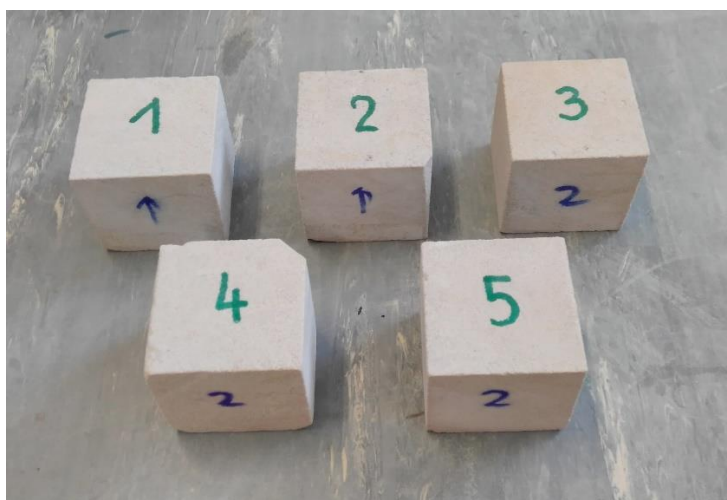
3.2.1 Popis laboratorních vzorků

Zkušební tělesa mají tvar kvádrů, hranolů a válců.

U všech vzorků byly stanoveny rozměry digitálním posuvným měřítkem a hmotnost v přirozeně nasyceném stavu na digitální váze.

Krychle

Zkoumáno bylo celkem 5 krychlí. V následujících kapitolách jsou označeny jako K-1 až K-5.



Obrázek 3.2.1-1 Fotografie krychlových těles

Tabulka 3.2.1-1 Naměřené hodnoty krychlí

Označení vzorku	m (g)	a_1 (mm)	a_2 (mm)	a_3 (mm)
K-1	255,07	51,79	49,95	51,37
K-2	259,51	52,05	49,85	51,83
K-3	257,59	51,34	49,79	51,72
K-4	253,56	51,65	49,78	51,84
K-5	255,74	51,78	49,77	51,72

Hmotnost vzorků ve stavu přirozeného nasycení je označena m a a_1 , a_2 a a_3 představují délky hran krychlí.

Hranoly

Zkoumány byly 2 hranoly. V následujících výpočtech mohou být označeny jako H-1 a H-2.



Obrázek 3.2.1-2 Fotografie hranolů

Tabulka 3.2.1-2 Naměřené hodnoty hranolů

Označení vzorků	m (g)	a_1 (mm)	a_2 (mm)	L (mm)
H-1	1 148,98	51,69	49,79	226,25
H-2	1 147,94	51,70	49,81	226,25

Hmotnost m je hmotnost hranolů v přirozeně nasyceném stavu. Rozměry a_1 a a_2 představují šířku a výšku a L je délka hranolů.

Válce

Zkušební válcová tělesa byla získána jádrovým vrtáním z desky o tloušťce 50 mm. Cílem bylo vytvořit vzorky podobných průměrů (227 mm - 228 mm), jakých dosahovaly sloupy na zámku v Bučovicích, aby bylo možné na nich simulovat měření, které probíhalo i na konstrukci. Zároveň byla na těchto vzorcích provedena měření, která na sloupech nebylo možné realizovat. Tato měření se zaměřila na vady uvnitř materiálu a jeho nehomogenitu.

Vzorky jsou označeny jako válce, avšak půdorysné rozměry převládají nad jejich výškou. Jejich vzhled připomíná spíše kotouč. Dále ve výpočtech mohou být vzorky označeny V-1 až V-3.



Obrázek 3.2.1-3 Válec č.1



Obrázek 3.2.1-4 Válec č.2



Obrázek 3.2.1-5 Válec č.3

Tabulka 3.2.1-3 Naměřené hodnoty vzorků tvaru válce

Označení vzorku	m (g)	t (mm)	d (mm)	o (mm)
V-1	3 877,08	49,69	226,75	712,00
V-2	3 956,15	49,76	227,25	714,00
V-3	3 972,76	49,71	227,75	716,00

Hmotnost přirozeně nasycených vzorků je označena m , t je výška válce, průměr je označen d a obvod vzorků o je stanoven dle vztahu:

$$o = d \cdot \pi \quad [31]$$

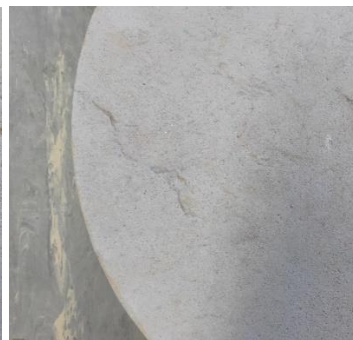
Na vzorcích kruhové průřezu jsou patrné následující přirozené vady.



Obrázek 3.2.1-6 Vada vzorku č.1



Obrázek 3.2.1-7 Další vada vzorku č.1



Obrázek 3.2.1-8 Vada vzorku č.2

3.2.2 Stanovení nasákavosti vodou za atmosférického tlaku

Nasákavost byla stanovena na vzorcích označených K-1, K-3, K-5, H-1 a H-2 v souladu s ČSN EN 13755 – Stanovení nasákavosti vodou za atmosférického tlaku.

Nasákavost vodou za atmosférického tlaku A_b jednotlivých zkušebních těles byla stanovena dle vzorce uvedeného v kapitole 2.3.1

Výsledky jsou vyjádřeny v tabulce 3.2.2-1 s přesností na nejbližší 0,1 %.

Tabulka 3.2.2-1 Nasákavost zkušebních těles

Označení vzorku	m_d (g)	m_s (g)	A_b (%)	A_b (%)
K-1	254,71	276,28	8,5	8,0
K-3	257,21	276,93	7,7	
K-5	255,43	275,63	7,9	
H-1	1 147,23	1 234,26	7,6	7,7
H-2	1 146,12	1 236,00	7,8	

Norma ČSN 72 1800 uvádí pro hutný pískovec maximální nasákavost 5,0 % a pro pískovec pórovitý maximální hodnotu 15 % [4]. Průměrná hodnota nasákavosti stanovená na krychlích je 8,0 % a na hranolech 7,7 %. Tato hodnota odpovídá pórovitému pískovci.

3.2.3 Stanovení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost byla stanovena dle ČSN EN 1936 na vzorcích H-1, H2 a K-1 až K-5. Z normy vyplývá, že v případě přírodních kamenů větší pórovitosti, lze jejich zdánlivý objem stanovit měřením rozměrů zkušebních těles v laboratoři na nejbližší milimetr [20]. Objemová hmotnost ρ_b je stanovena dle vztahu:

$$\rho_b = \frac{m_d}{V_b},$$

kde m_d (g) je hmotnost vysušeného zkušebního tělesa a V_b (mm³) je zdánlivý objem.

Tabulka 3.2.3-1 Objemová hmotnost zkušebních těles

Označení vzorku	m_d (g)	V_b (mm ³)	ρ_b (kg/m ³)	$\overline{\rho_b}$ (kg/m ³)
K-1	254,71	132 863	1 917	1 921
K-2	259,13	134 457	1 927	
K-3	257,21	132 182	1 946	
K-4	253,22	133 274	1 900	
K-5	255,43	133 261	1 917	
H-1	1 147,23	582 257	1 970	1 969
H-2	1 146,12	582 605	1 967	

Měřením byla stanovena průměrná hodnota objemové hmotnosti na krychlích $\rho_b = 1\,921\text{ kg/m}^3$ a na hranolech $\rho_b = 1\,969\text{ kg/m}^3$. Tato hodnota splňuje podmínku minimální objemové hmotnosti rovné $1\,800\text{ kg/m}^3$ pro pórovitý pískovec dle normy [4].

3.2.4 Stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku byla měřena na krychlových zkušebních tělesech. Zkouška byla provedena na vysušených vzorcích K-2 a K-4 dle ČSN EN 1926 a na nasycených vzorcích K-1, K-3 a K-5 dle přílohy A této normy [21].



Obrázek 3.2.4-1 Vzorek č.1 namáhán zkušebním lisem

Tabulka 3.2.4-1 Pevnost v prostém tlaku stanoveném na vysušených vzorcích

Onačení vzorku	$A\text{ (mm}^2\text{)}$	$F\text{ (N)}$	$R\text{ (MPa)}$	$\bar{R}\text{ (MPa)}$
K-2	2 697,5	72 800	27	27
K-4	2 677,5	73 000	27	



Obrázek 3.2.4-2 Porušení vysušených zkušebních těles

Z obrázku 3.2.4-2 je patrné, že došlo k porušení průřezu vyhovujícím způsobem.

Směrodatná odchylka a variační součinitel nebyli pro vzorky K-2 a K-4 stanoveny vzhledem k malému počtu vzorků. Průměrná pevnost pískovce v prostém tlaku na vysušených tělesech je 27 MPa. Tato hodnota je uspokojující vzhledem k tomu, že norma [4] doporučuje pro pórovitý pískovec nejméně 15 MPa.

Tabulka 3.2.4-2 Pevnost v prostém tlaku nasycených vzorků

Onačení vzorku	$A \text{ (mm}^2\text{)}$	$F \text{ (N)}$	$R \text{ (MPa)}$	$\bar{R} \text{ (MPa)}$	$s \text{ (MPa)}$	$v \text{ (-)}$
K-1	2 660,2	83 400	31	35	5	0,143
K-3	2 654,8	107 000	40			
K-5	2 677,8	86 000	32			

Zatěžováním nasycených těles bylo dosaženo vyšší průměrné hodnoty v tlaku $35 \pm 5 \text{ MPa}$ s variačním součinitelem $v = 0,143$. Toto měření není zcela průkazné vzhledem k malému počtu zkoušených těles. Norma [4] neudává minimální hodnoty pevnosti v tlaku pro nasycená tělesa.



Obrázek 3.2.4-3 Porušení nasycených zkušebních těles

3.2.5 Stanovení rychlosti šíření ultrazvuku

Tato zkouška byla provedena v souladu s ČSN EN 14579 [23]. Podstata zkoušky i ultrazvukové metody je popsána v kapitole 2.4.

K měření byl použit přístroj Pundit PL-200 a vždy bylo užito metody přímého prozvučování. Frekvence sond byla 150 kHz a tyto sondy byly ke zkušebním tělesům připevněny pomocí plastelíny, která plnila funkci vazebného akustického prostředku. Před měřením každého tělesa, byla provedena kontrolní zkouška průchodu ultrazvukového vlnění etanolem.

Měření na krychlích

Hodnocení bylo provedeno na suchých vzorcích. Délka dráhy prozvučování je $L = 50 \text{ mm}$ (zaokrouhleno).

Na krychli K3 byla naměřena nejvyšší průměrná rychlost ultrazvuku $v = (3\,124 \pm 11) \text{ m/s}$ a stanoven variační součinitel $v = 0,004$.

Tabulka 3.2.5-1 Rychlost šíření ultrazvuku krychlemi

Označení vzorku	$v \text{ (m/s)}$	$\bar{v} \text{ (m/s)}$	$s \text{ (m/s)}$	$v \text{ (-)}$
K-1	3 073	3060	11	0,004
	3 054			
	3 054			
K-2	3 054	3079	29	0,009
	3 073			
	3 111			
K-3	3 130	3124	11	0,004
	3 111			
	3 130			
K-4	2 981	2975	10	0,003
	2 963			
	2 981			
K-5	3 054	3073	19	0,006
	3 092			
	3 073			

Měření na hranolech

Délka dráhy měření je u obou hranolů rovna 226 mm. Hranoly byly měřeny ve stavu suchém a nasyceném. Hodnoty suchých vzorků jsou označeny písmenem C a hodnoty nasycených vzorků písmenem D.

Při prozvučování nasycených vzorků bylo dosaženo lepších výsledků než na vysušených vzorcích. Maximální rychlost $v = (3\,092 \pm 3) \text{ m/s}$ byla stanovena na hranolu č. 1 v nasyceném stavu.

Tabulka 3.2.5-2 Rychlost šíření ultrazvuku hranoly

Označení vzorku		v (m/s)	\bar{v} (m/s)	s (m/s)	v (-)	Označení vzorku		v (m/s)	\bar{v} (m/s)	s (m/s)	v (-)
H-1	C	2 943	2 952	19	0,006	H-2	C	2 935	2 911	32	0,011
		2 939						2 924			
		2 974						2 875			
	D	3 092	3 092	3	0,001		D	3 042	3 045	4	0,001
		3 092						3 038			
		3 092						3 046			
		3 096						3 046			
		3 087						3 050			
		3 092						3 046			

Měření na válcích

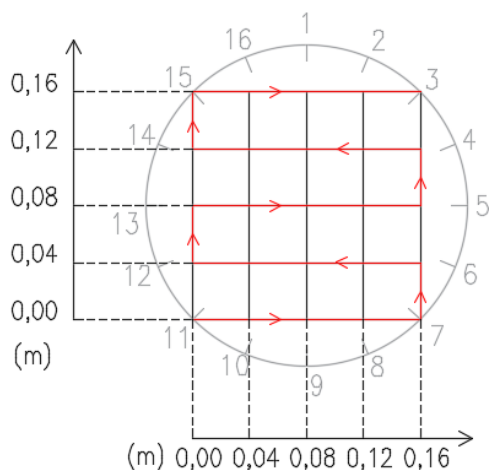
Rychlost šíření ultrazvuku na válcích je vyjádřena pomocí plošného i liniového skenování průřezu. Délka dráhy prozvučování závisí na druhu skenování. Prozvučování bylo vždy přímé.

Plošné skenování

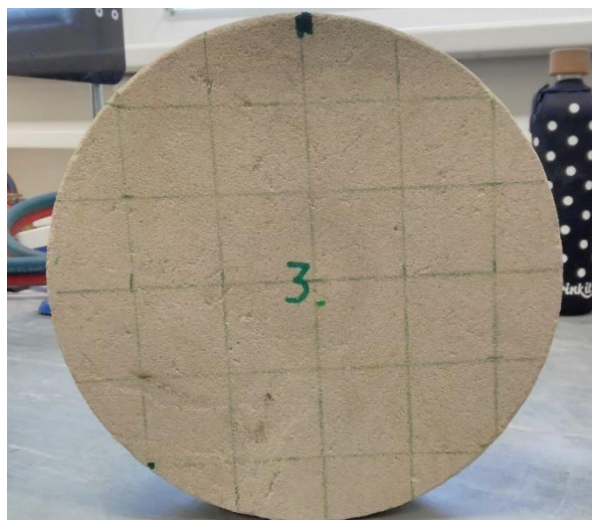
Plošné měření bylo prováděno dvojím způsobem. Nejdříve byla na jednotlivých vzorcích po obou stranách kruhového průřezu naznačena síť 25 bodů s podélnými i příčnými rozestupy bodů 40 mm. Prozvučování probíhalo dle schématu 3.2.5-1 směrem odspodu nahoru a zleva doprava. Délka prozvučování odpovídala výšce t daného vzorku.

Dalším z plošných měření bylo měření po obvodu rozděleném na osm základů. V těchto základnách byla rychlost šíření ultrazvuku měřena v obou směrech (po směru i proti směru hodinových ručiček) a tím bylo získáno 16 naměřených údajů. Rastrový graf vznikl jako alternativa k liniovému měření po obvodu. Tento graf věrohodněji znázorňuje průběh rychlosti UZ v průřezu. Tento postup byl aplikován pouze u vzoru válce č.1 a délka dráhy prozvučování odpovídá jeho průměru d .

Vizuální prohlídkou zkušebních těles byla na jejich povrchu odhalena místa, jež působila pórovitě a méně hutně. Tato místa nejspíše vznikla při usazování jednotlivých vrstev pískovce. Cílem plošného měření bylo ověření těchto nehomogenit horniny.



Obrázek 3.2.5-1 Schéma prozvučování

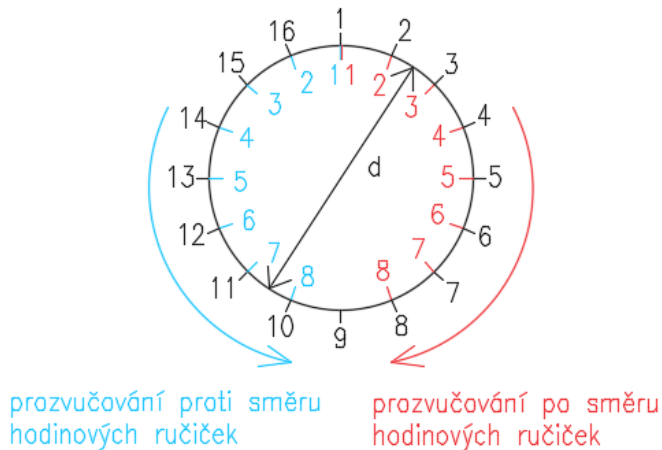


Obrázek 3.2.5-2 Ukázka rozvržení bodů na válci č.3

Liniové skenování

Všechna zkušební válcová tělesa byla liniově prozvučována nejprve proti a poté po směru hodinových ručiček. Pro zpracování a popis byly vybrány méně příznivé výsledky z těchto dvou měření. Délka dráhy prozvučování odpovídá průměru d měřeného tělesa.

Obvod sloupu byl rozdělen na 8 měřených základů a 16 oddílů.



Obrázek 3.2.5-3 Schéma liniového skenování válců

Toto měření je zpracováno v podobě následujících grafů. U každého zkušební vzorku válce je uvedeno zpracování plošného i liniového skenování tak, aby jako celek vypovídalo o celkovém stavu vzorku, zejména o jeho poškození a nehomogenitách. Na paprskovém grafu je vyjádřen relativní pokles rychlosti šíření ultrazvuku tak, jako tomu bylo u měření in situ

na pískovcových sloupech. V tomto grafu uvažujeme vždy část průřezu idealizovanou dle nejvyšších naměřených rychlostí daného průřezu.

VÁLEC Č.1

Válec má průměr 226,75 mm, obvod 712 mm a výšku 49,69 mm. Toto zkušební těleso dopadlo při vizuální prohlídce nejhůře. Na následujících obrázcích jsou přirozené vady tohoto zkušebního tělesa.

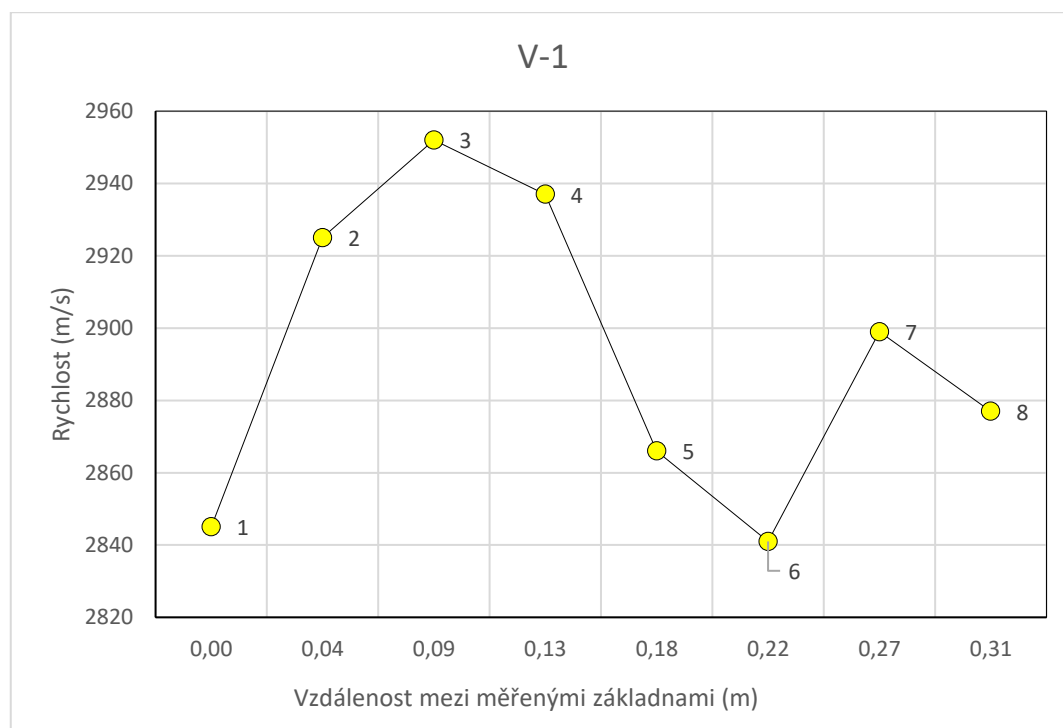


Obrázek 3.2.5-4 Vada válce č.1

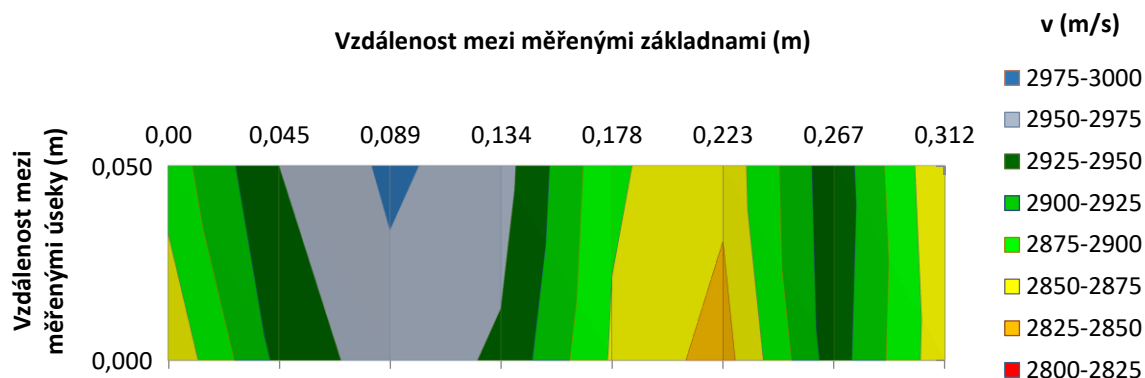
Obrázek 3.2.5-5 Další vada válce č.1

Obrázek 3.2.5-6 Celková fotografie válce č.1

Na zkušebním tělese V-1 bylo nejprve provedeno skenování plošné i liniové v 8 základnách. Dráha prozvučování byla rovna průměru průřezu d .

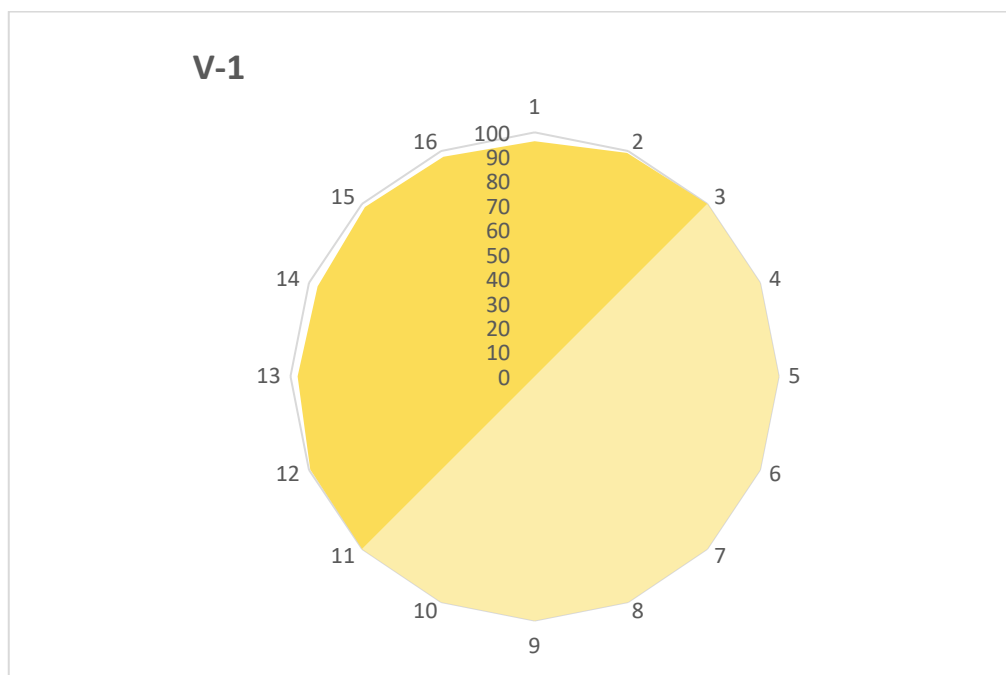


Graf 3.2.5-1 V-1: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách



Graf 3.2.5-2 V-1: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách na rozvinutém pásu

Cílem těchto grafů je co nejspolehlivěji znázornit rychlost šíření ultrazvuku příčným řezem tělesa. Vzájemnou korelaci grafů lze ověřit pomocí nejnižší a nejvyšší dosažené rychlosti. V grafu 3.2.5-1 je patrné, že maximální rychlost $v = 2\,952\text{ m/s}$ byla dosažena v základně č. 3, která odpovídá na rozvinutém pásu odpovídá tmavě modře zbarvené ploše. Naopak nejnižší rychlost $v = 2\,841\text{ m/s}$ byla stanovena v bodě č. 6 a této hodnotě odpovídá v grafu 3.2.5-2 plocha tmavě oranžová.

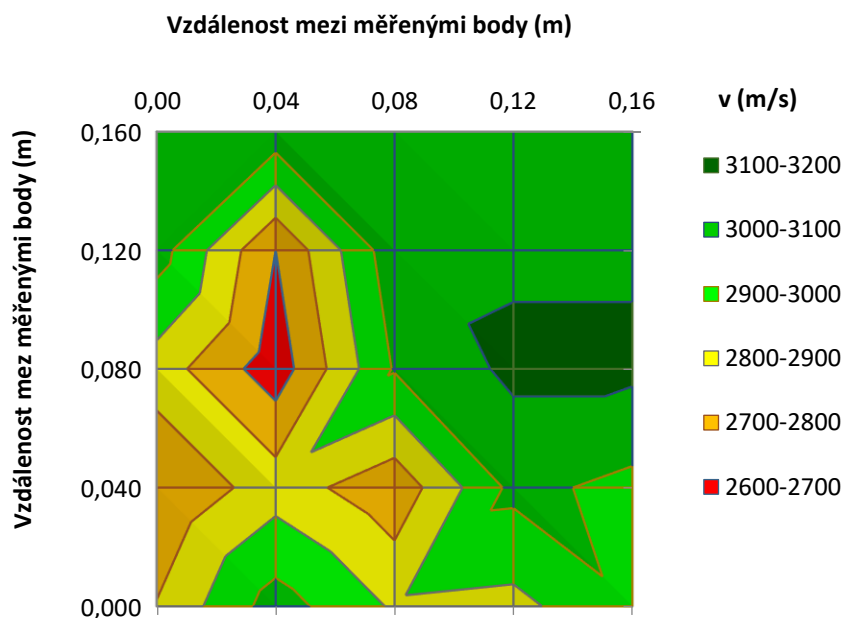


Graf 3.2.5-3 V-1: Relativní procentuální pokles rychlosti ultrazvuku

Souvislost mezi jednotlivými znázorněními je patrná i v grafu 3.2.5-3. Relativní procentuální pokles rychlosti šíření ultrazvuku odpovídá v oddílu 3-11 základně 3 a v oddílu 6-14 základně 6.

Plošný graf rozvinutého pásu a graf relativního poklesu rychlosti šíření zvuku slouží k lepší vizualizaci naměřených hodnot. Je patrné, že tento účel plní lépe plošný graf.

Zkušební těleso V-1 bylo dále plošně prozvučováno po výšce t v bodovém rastru.



Graf 3.2.5-4 V-1: Rychlost šíření ultrazvuku zobrazená v půdorysném rastru

Graf 3.2.5-4 znázorňuje nerovnoměrnost materiálu zkušební tělesa. Srovnání tohoto grafu s obrázkem 3.2.5-6 dokazuje účinnost a dostatečnou výpovědní hodnotu této metody, neboť měřením bylo dokázáno, že ultrazvuková metoda dokáže věrohodně znázornit nedokonalou homogenitu materiálu.

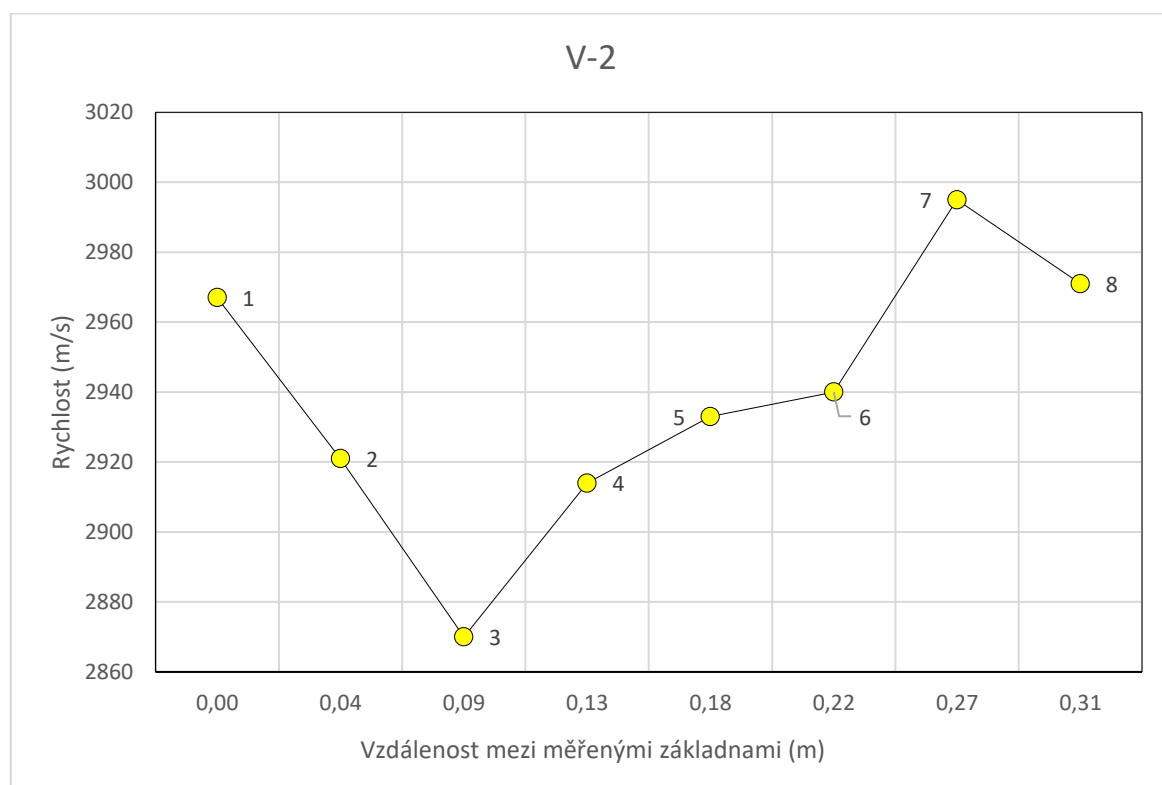
VÁLEC Č.2

Válec má průměr 227,25 mm, obvod 714 mm a výšku 49,76 mm. Toto zkušební těleso dopadlo při vizuální prohlídce lépe než V-1, na povrchu jsou dobře viditelné plochy vrstevnatosti. Na následujícím obrázku jsou přirozené vady tohoto zkušební tělesa.

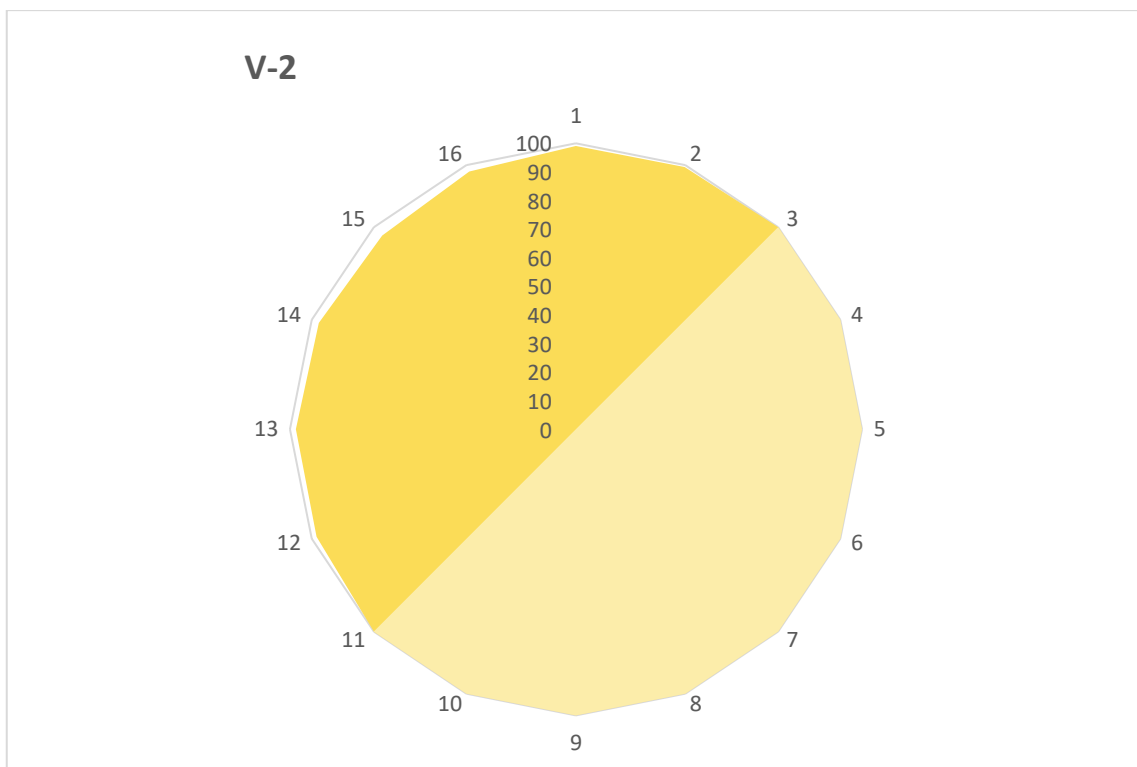


Obrázek 3.2.5-7 Ukázka vnitřních nehomogenit válce č. 2

Na zkušebním tělese V-2 bylo nejprve provedeno liniové skenování v 8 základnách. Dráha prozvučování byla rovna průměru průřezu d .

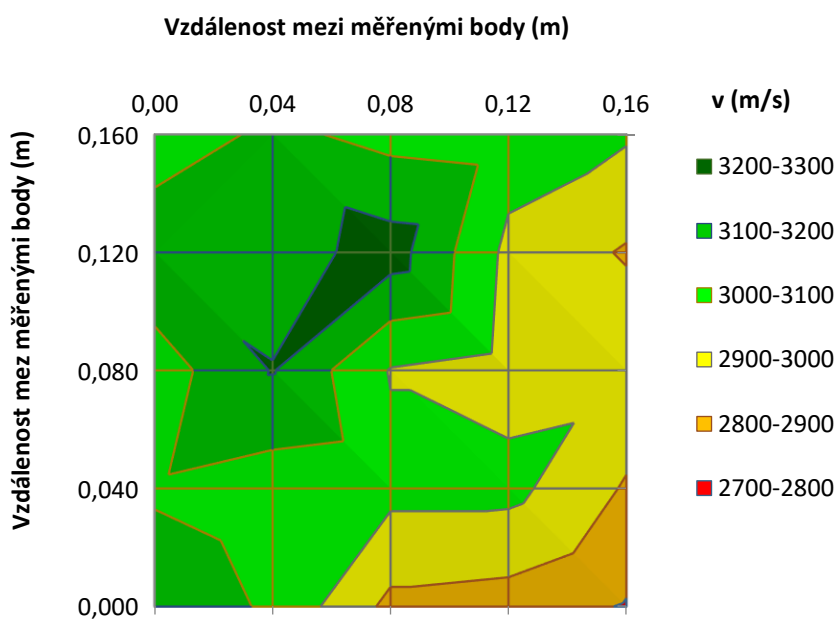


Graf 3.2.5-5 V-2: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách



Graf 3.2.5-6 V-2: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření ultrazvuku

Nejvyšší rychlost $v = 2\,995\text{ m/s}$ byla stanovena v oddílu 3-11 a nejnižší $v = 2\,870\text{ m/s}$ v 7-15. Rozdíl mezi těmito hodnotami je velmi malý a značí fakt, že průřez není nijak poškozen. Zkušební těleso V-2 bylo dále plošně prozvučováno po výšce t v bodovém rastru.



Graf 3.2.5-7 V-2: Rychlost šíření ultrazvuku zobrazená v půdorysném rastru

Graf 3.2.5-7 znázorňuje nerovnoměrnost materiálu. V pravé dolní části grafu rychlost výrazně klesla, což značí nedokonalou homogenitu tělesa v těchto místech. Nejspíše se v těchto místech vyskytují póry nebo je zde materiál méně zhutněný.

VÁLEC Č.3

Válec má průměr 227,75 mm, obvod 716 mm a výšku 49,71 mm. Toto těleso mělo velmi hezký povrch a na začátku měření nebylo nijak poškozeno. Později byla na tělese pro účely měření vytvořena umělá vada.

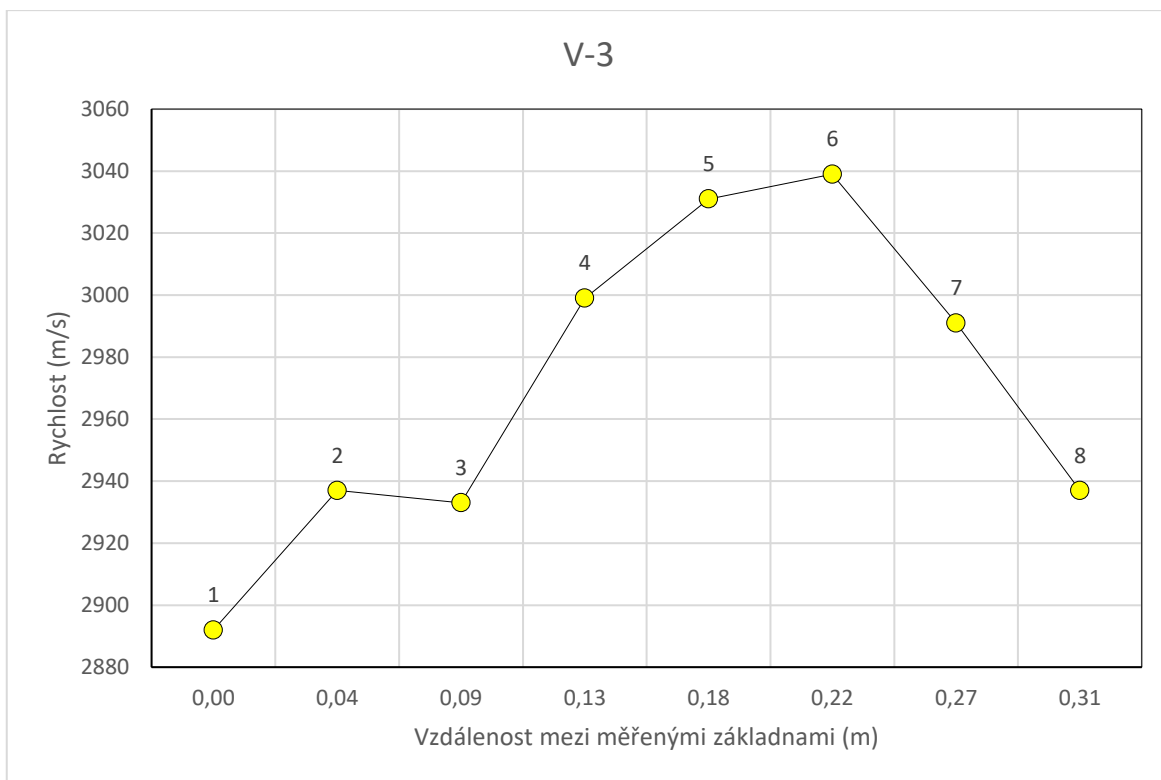


Obrázek 3.2.5-8 Nepoškozený válec č. 3 - zepředu

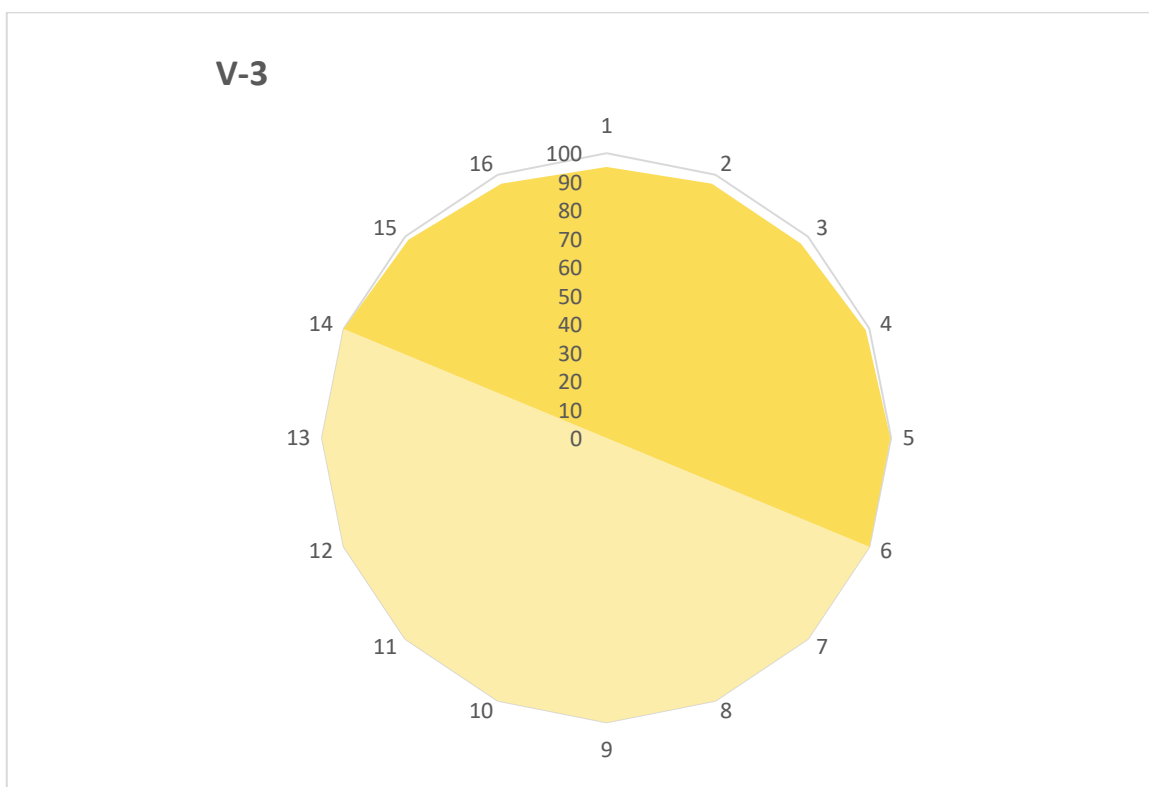


Obrázek 3.2.5-9 Zadní strana válce č. 3 - zezadu

Na zkušebním tělese V-3 bylo nejprve provedeno liniové skenování v 8 základnách. Dráha prozvučování byla rovna průměru průřezu d .



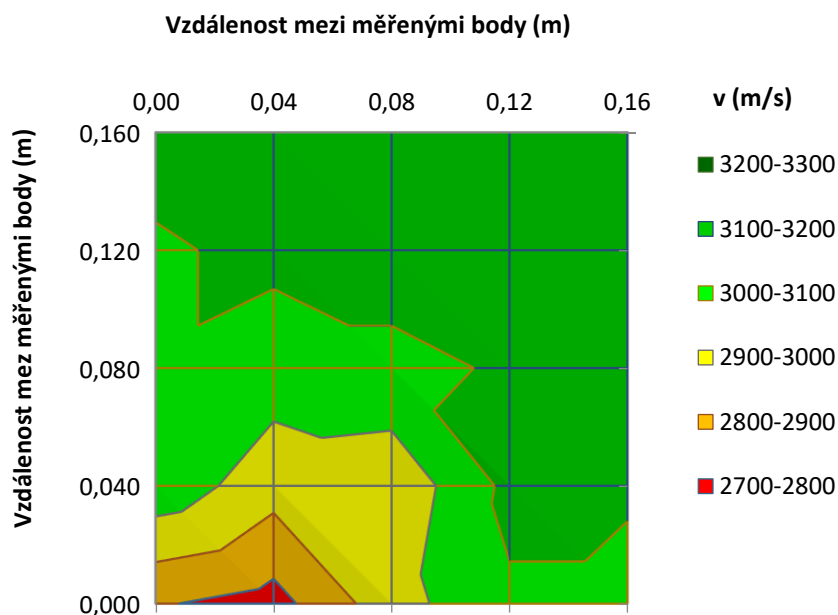
Graf 3.2.5-8 V-3: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých bodech



Graf 3.2.5-9 V-3: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření ultrazvuku

Nejvyšší rychlost $v = 3\,039\text{ m/s}$ byla stanovena v oddílu 6-14 a nejnižší $v = 2\,892\text{ m/s}$. Rozdíl mezi těmito hodnotami je velmi malý a značí fakt, že průřez není nijak poškozen.

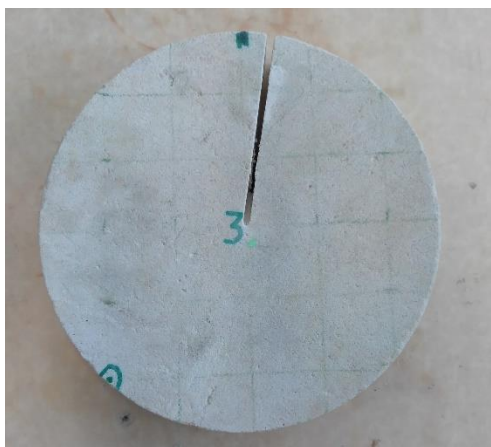
Zkušební těleso V-3 bylo dále plošně prozvučováno po výšce t v bodovém rastru.



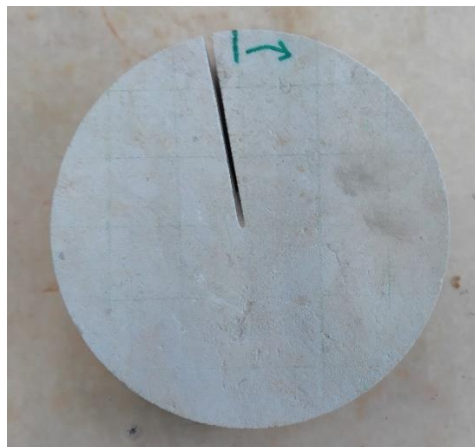
Graf 3.2.5-10 V-3: Rychlost šíření ultrazvuku zobrazená v půdorysném rastru

Dle grafu 3.2.5-10 je zřejmé, že na okraji tělesa dochází ke zpomalení rychlosti šíření ultrazvuku vlivem existující překážky. Tato překážka představuje nehomogenitu tělesa a může ji způsobovat změna hutnosti materiálu nebo přítomnost shluku drobných dutin.

Na vzorku V-3 byla záměrně vytvořena umělá vada. Vada představuje radiální trhlinu směřující do středu průřezu.

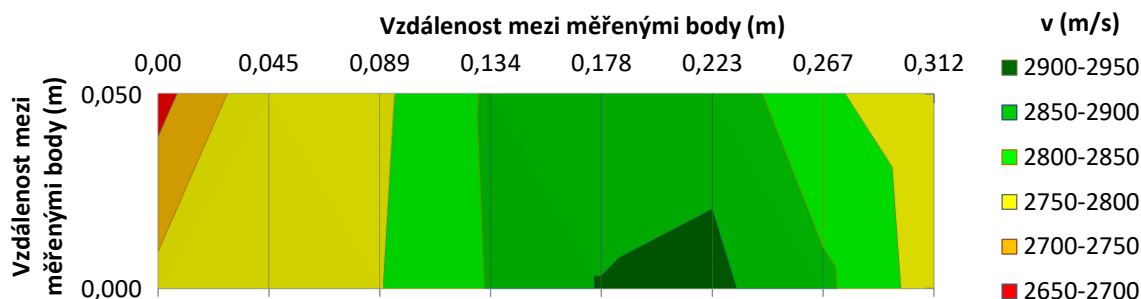


Obrázek 3.2.5-10 V-3: Uměle vytvořená trhlina - zepředu



Obrázek 3.2.5-11 V-3: Uměle vytvořená trhlina - zezadu

Průřez s trhlinou byl měřen pomocí plošného skenování v osmi základnách ve dvou směrech, přičemž bylo získáno celkem 16 hodnot. Toto vyjádření průběhu rychlosti šíření ultrazvuku se ukázalo jako efektnější vizualizace než pomocí grafu relativního procentuálního poklesu.



Graf 3.2.5-11 V-3: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách na rozvinutém pásu v průřezu s trhlinou

Graf 3.2.5-12 dokazuje, že trhlina téměř neovlivnila výsledky měření. Průběh výsledků je srovnatelný s průběhem grafů 3.2.5-8 a 3.2.5-9. Došlo jen k mírnému poklesu rychlosti, ale ne k žádnému razantnějšímu, který by poukazoval na trhlinu v radiálním směru. Ultrazvuk vadu vždy obešel.

Toto měření bylo realizováno pro srovnání průběhu této trhliny a trhlin na konstrukci sloupů.

3.2.6 Výsledky laboratorního měření

Zkouškami v laboratoři bylo stanoveno, že pískovec má průměrnou nasákavost 7,9 % a jeho objemová hmotnost je $\rho_b = 1\,945 \text{ kg/m}^3$. Tyto hodnoty splňovaly parametry pórovitého pískovce dle normy [4]. Pevnost tlaku $R = (35 \pm 5) \text{ MPa}$ byla stanovena na vysušených vzorcích. Při zatěžování nasycených vzorků došlo k anomálii a při tomto měření nasycená tělesa vykazovala vyšší pevnost v tlaku než tělesa vysušená.

Měření průchodu ultrazvuku probíhalo nejdříve na krychlích a hranolech. Pokles rychlosti byl v rámci těchto vzorků maximálně do 10 %. Nasycené vzorky vykazovaly opět lepší hodnoty než vysušené.

Při měření na válcích bylo aplikováno více postupů prozvučování tak, aby výsledky poskytovaly komplexní přehled o stavu zkušebních vzorků.

Celkové porovnání naměřených hodnot přináší následující tabulka. Číslo za pomlčkou označení vzorku vyjadřuje směr měření (1 – proti směru a 2 – po směru hodinových ručiček). Písmeno T označuje vzorek s již provedenou trhlinou.

Tabulka 3.2.6-1 Souhrn všech naměřených hodnot rychlostí šíření ultrazvuku na válcích

Označení základny	Označení válce							
	V-1-1	V-1-2	V-2-1	V-2-2	V-3-1	V-3-2	V-3.T-1	V-3.T-2
	Rychlost šíření zvuku sloupem (m/s)							
9-1	2 835	2 845	2 967	2 987	2 899	2 892	2 886	2 854
10-2	2 923	2 925	2 971	2 940	2 948	2 937	2 950	2 931
11-3	2 930	2 952	2 995	2 907	3 007	2 933	2 980	2 965
12-4	2 860	2 937	2 940	2 929	3 043	2 999	2 961	2 946
13-5	2 860	2 866	2 933	2 940	3 039	3 031	2 879	2 872
14-6	2 934	2 841	2 914	2 975	2 999	3 039	2 857	2 839
15-7	2 953	2 899	2 870	3 003	2 944	2 991	2 942	2 938
16-8	2 915	2 877	2 921	2 948	2 910	2 937	2 850	2 857

Všechny rychlosti nevykazovaly pokles vůči průměrné rychlosti větší než 10 % (označeno zeleně), což znamená, že vzorky nejsou nijak poškozené v tangenciálním směru vůči kruhovému průřezu.

3.2.7 Shrnutí laboratorního měření

Stanovení základních charakteristik dokázalo, že se jedná o pórovitý pískovec.

Měřením ultrazvukovou metodou byly na zkušebních tělesech stanoveny nižší rychlosti, než při měření na sloupech. To je důkaz, že v laboratoři byl testován pískovec nižší kvality, než z kterého byly vyrobeny sloupce na zámku v Bučovicích.

V laboratoři mohlo být uskutečněno kromě měření radiálního i plošné skenování. Při radiálním měření nebyly shledány v žádném průřezu poklesy rychlosti o více než 10 %, což znamená, že žádný průřez nebyl poškozený.

Na vzorku V-3 byl proveden experiment v podobě vytvoření umělé trhliny, jdoucí v radiálním směru. Účelem tohoto experimentu bylo vyvrácení hypotézy ze strany památkové péče, že sloupce na zámku v Bučovicích jsou poškozeny trhlinami v radiálním směru jdoucími do hloubky. Vzhledem k tomu, že při měření v laboratoři, nebyla tato umělá vada ultrazvukem zaznamenána, je zřejmé, že naměřené poklesy rychlosti šíření zvuku na sloupech nemohou být způsobené radiálními trhlinami. Je tedy evidentní, že trhliny viditelné na povrchu sloupce musely mít jiný charakter, což podporuje teorii, že k porušení docházelo v tangenciálním směru v plochách vrstevnatosti.

Účelem plošného skenování bylo dokázat, že struktura pískovce není dokonale homogenní a vykazuje poklesy rychlosti ultrazvuku v místech těchto nehomogenit. U pískovce lze předpokládat,

že mezi tyto nehomogenity patří především nerovnoměrná hutnost, póry a shluk malých dutin. Plošné skenování přineslo autentické zobrazení struktury pískovce.

V laboratoři bylo též uplatněno plošného skenování po obvodu válců a bylo zhodnoceno, že přináší věrohodnější vyobrazení průběhu rychlostí v jednotlivých základnách než zobrazení pomocí relativního poklesu šíření rychlosti.

4 ZÁVĚR

V této bakalářské práci byl stanoven postup pro hodnocení kamenných konstrukcí zohledňující jejich specifika. Dále byly popsány významné vlastnosti kamene a způsoby jejich ověřování. V první kapitole jsou vyzdvíženy vlastnosti a příklady užití žuly a pískovce. Tyto horniny patří k nejvíce užívaným ke kamenické výrobě.

Praktická část se zaměřuje pouze na měření pískovce. V první části byly měřeny pískovcové sloupy in situ na státním zámku v Bučovicích. Měření bylo realizováno na základě obav o míře poškození těchto sloupů, z nichž některé byly již v minulosti bandážovány. Pro hodnocení stavu konstrukce byla zvolena neinvazivní ultrazvuková metoda, neboť se jedná o památkově chráněnou stavbu. Vzhledem k tomu, že sloupy mají kruhový průřez, bylo je možné měřit UZ metodou pouze v radiálním směru.

Cílem laboratorního měření bylo upřesnění výsledků dosažených měření na sloupech a zlepšení jejich interpretace. Zkoumán byl hořícký pískovec, který byl podobný pískovci, z něhož jsou zhotoveny sloupy. Jádrovým vrtáním byla zhotovena zkušební tělesa kruhového průřezu velikosti 227–228 mm, aby sloužila jako simulace sloupů. Rychlost šíření ultrazvuku na těchto vzorcích bylo možné zkoumat nejen v radiálním, ale i tangenciálním směru. Kombinací výsledků obou postupů bylo zjištěno, že u neporušených vzorků nemá jejich nestejnoroost a vady příliš velký vliv na rychlost šíření tělesem.

Pomocí uměle vytvořené vady bylo možné srovnat měření v laboratoři s měření na sloupech. Odlišné výsledky obou zkoumání pomáhají vyvrátit hypotézu o poškození sloupů radiálními trhlinami jdoucími do hloubky. Tento experiment naopak potvrzuje teorii, že k porušování u sloupů dochází v tangenciálním směru, a vzhledem ke struktuře materiálu, se tomu děje v plochách vrstevnatosti. Pravděpodobnou příčinou poškození sloupů jsou povětrnostní vlivy, zejména vliv teploty.

SEZNAM CITOVANÝCH ZDROJŮ

- [1] SLOUKA, J. *Kámen: od horniny k soše*. 1. Praha: Grada, 2007. ISBN 978-80-247-1258-1.
- [2] ČSN ISO 13822 (730038) - *Zásady navrhování konstrukcí - Hodnocení existujících konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [3] KUKAL, Z. *Horninové prostředí České republiky: jeho stav a ochrana*. 1. Praha: Český geologický ústav, 2000. ISBN 80-7075-413-3.
- [4] ČSN 72 1800 - *Přírodní stavební kámen pro kamenické výrobky - Technické požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1989.
- [5] VELFLÍK, A. *Nauka o stavebních hmotách: zvláště o horninách technicky významných, o jejich zkoumání a zpracování*. Praha: Česká matice technická, 1917.
- [6] *Mrákotínský obelisk* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.praguecityline.cz/wp-content/gallery/prazsky-hrad-iii-nadvori/pha1-prazsky-hrad-iii-nadvori0405.jpg>
- [7] *Praha svým vítězným synům* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: https://1gr.cz/fotky/idnes/15/082/org/JSK5d4270_20150722_090620.jpg
- [8] *Pomník Jana Husa na Staroměstském náměstí* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.digital-guide.cz/media/cache/be/21/be21ffc63087921dd9168cf0673ee2b7.jpg>
- [9] *Kostel Nanebevzetí Panny Marie* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/portal/pls/portal/docs/1/8764248.JPG>
- [10] *Rudolfinum* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://www.avantgarde-prague.cz/media/gallery/original/prague-rudolfinum-3.jpg>
- [11] *Chrám svaté Barbory v Kutné Hoře* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: http://www.ikutnahora.cz/wp-content/uploads/2012/06/best-of_04.jpg
- [12] *Replika sochy sv. Anny na Karlově mostě* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/portal/pls/portal/docs/1/8812248.JPG>
- [13] *Gamma BB-Centrum* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: http://www.stavbaroku.cz/db_image/site_large/6.jpg

- [14] HOLICKÝ, M. *Příručka pro hodnocení existujících konstrukcí*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT v Praze, 2007. ISBN 978-80-01-03790-4.
- [15] ŠKABRADA, J. *Konstrukce historických staveb*. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02071-1.
- [16] JUNDROVSKÝ, R., E. TICHÝ, ed. *Kamenictví: Tradice z pohledu dneška*. 2. Praha: Grada, 1910.
- [17] ČSN EN 73 3251 - *Navrhování konstrukcí z kamene*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [18] HOBST, L., J. ADÁMEK, P. CIKRLÉ a P. SCHMID. *Diagnostika stavebních konstrukcí: Přednášky*. Brno: FAST VUT v Brně, 2005.
- [19] ČSN EN 13755 - *Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení nasákavosti vodou za atmosférického tlaku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.
- [20] ČSN EN 1936 - *Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení měrné a objemové hmotnosti a celkové a otevřené pórovitosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007.
- [21] ČSN EN 1926 - *Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení pevnosti v prostém tlaku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007.
- [22] ČSN 73 1371 - *Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [23] ČSN EN 14579 - *Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení rychlosti šíření zvuku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [24] SCHMID, P. *Zkušebnictví a technologie: Stavební zkušebnictví*. Brno: FAST VUT v Brně
- [25] *Ultrasonic Pulse Velocity PUNDIT PL-200* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Pundit%20PL-2_Sales%20Flyer_English_high.pdf
- [26] *Informace o městě Bučovice* [online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <http://www.bucovice.cz/mesto-bucovice/d-53/p1=902>
- [27] *Fotografie zámku Bučovice: přední pohled* [online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <https://www.zamek-bucovice.cz/pamatky/bucovice/fotogalerie/exterie/01.jpg>
- [28] *Fotografie zámku Bučovice: pohled ze zahrady* [online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <https://www.zamek-bucovice.cz/pamatky/bucovice/fotogalerie/exterie/16.jpg>

- [29] *Historie zámku Bučovice* [online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <https://www.zamek-bucovice.cz/cs/o-zamku/historie>
- [30] *Fotoarchiv: doc. Ing. Petr CIKRLE, Ph.D.*
- [31] ČUŘÍK, František, ed., František KLOKNER, ed. a Jan VOJTĚCH, ed., F. ČUŘÍK, F. KLOKNER, J. VOJTĚCH. *Matematické tabulky*. Čtvrté vydání. Praha: Vědecko-technické nakladatelství, 1950. Technický průvodce.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1.1-1 Mrákotínský monolit [6]	13
Obrázek 2.1.1-2 Pomník Praha svým vítězným synům [7]	14
Obrázek 2.1.1-3 Pomník Jana Husa na Staroměstském náměstí [8]	14
Obrázek 2.1.1-4 Kostel Nanebevzetí Panny Marie v Mukařově [9]	15
Obrázek 2.1.2-1 Rudolfinum v Praze [10]	16
Obrázek 2.1.2-2 Chrám svaté Barbory v Kutné Hoře [11]	17
Obrázek 2.1.2-3 Replika sochy sv. Anny [12]	17
Obrázek 2.1.2-4 Budova Gamma BB-Centra [13]	17
Obrázek 2.2-1 Vývojový diagram postupu hodnocení existujících konstrukcí [2]	18
Obrázek 2.4.1-1 Uspořádání snímačů pro stanovení rychlosti impulsu [23]	27
Obrázek 2.4.2-1 Přístroj Proceq Pundit PL-200 [25]	28
Obrázek 3.1.1-1 Přední pohled na zámek [27]	28
Obrázek 3.1.1-2 Pohled na zámek ze zahrady [28]	31
Obrázek 3.1.1-3 Pohled na arkády	32
Obrázek 3.1.2-1 Číslování sloupů na severní straně objektu	32
Obrázek 3.1.2-2 Číslování sloupů na západní straně objektu – pravá část	33
Obrázek 3.1.2-3 Číslování sloupů na západní straně objektu – levá část	33
Obrázek 3.1.2-4 Číslování sloupů na jižní straně objektu	33
Obrázek 3.1.3-1 Schéma prozvučování sloupu o průměru d po obvodu rozděleném na 8 základů a 16 oddílů	34
Obrázek 3.1.4-1 Fotografie měřeného úseku sloupu 2-8 [30]	35
Obrázek 3.1.4-2 Fotografie sloupu 3-5	37
Obrázek 3.1.4-3 Detail horního úseku sloupu 3-5 [30]	37
Obrázek 3.1.4-4 Fotografie sloupu 3-7 [30]	41
Obrázek 3.1.4-5 Detail ploch vrstevnatosti sloupu 3-7 [30]	41
Obrázek 3.1.4-6 Fotografie sloupu 3-18 [30]	43
Obrázek 3.1.4-7 Fotografie detailu měřeného úseku sloupu 3-18 [30]	43
Obrázek 3.2.1-1 Fotografie krychlových těles	47
Obrázek 3.2.1-2 Fotografie hranolů	48
Obrázek 3.2.1-3 Válec č.1	49
Obrázek 3.2.1-4 Válec č.2	49
Obrázek 3.2.1-5 Válec č.3	49

Obrázek 3.2.1-6 Vada vzorku č.1.....	49
Obrázek 3.2.1-7 Další vada vzorku č.1.....	49
Obrázek 3.2.1-8 Vada vzorku č.2.....	49
Obrázek 3.2.4-1 Vzorek č.1 namáhán zkušebním lisem.....	51
Obrázek 3.2.4-2 Porušení vysušených zkušebních těles	51
Obrázek 3.2.4-3 Porušení nasycených zkušebních těles	52
Obrázek 3.2.5-1 Schéma prozvučování.....	55
Obrázek 3.2.5-2 Ukázka rozvržení bodů na válci č.3	55
Obrázek 3.2.5-3 Schéma liniového skenování válců	55
Obrázek 3.2.5-4 Vada válce č.1.....	56
Obrázek 3.2.5-5 Další vada válce č.1.....	56
Obrázek 3.2.5-6 Celková fotografie válce č.1.....	56
Obrázek 3.2.5-7 Ukázka vnitřních nehomogenit válce č. 2	59
Obrázek 3.2.5-8 Nepoškozený válec č. 3.....	61
Obrázek 3.2.5-9 Zadní strana válce č. 3.....	61
Obrázek 3.2.5-10 V-3: Uměle vytvořená trhlina – zepředu.....	63
Obrázek 3.2.5-11 V-3: Uměle vytvořená trhlina – zezadu.....	63

SEZNAM GRAFŮ

Graf 3.1.4-1 Sloup 2-8: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách.....	36
Graf 3.1.4-2 Sloup 2-8: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření ultrazvuku	36
Graf 3.1.4-3 Sloup 3-5.1: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách.....	38
Graf 3.1.4-4 Sloup 3-5.1: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření ultrazvuku	38
Graf 3.1.4-5 Sloup 3-5.2: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách.....	39
Graf 3.1.4-6 Sloup 3-5.2: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření ultrazvuku	40
Graf 3.1.4-7 Sloup 3-7: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách.....	41
Graf 3.1.4-8 Sloup 3-7: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření ultrazvuku	42
Graf 3.1.4-9 Sloup 3-18: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách.....	43
Graf 3.1.4-10 Sloup 3-18: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření ultrazvuku	44
Graf 3.2.5-1 V-1: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách.....	56
Graf 3.2.5-2 V-1: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách na rozvinutém pásu	57
Graf 3.2.5-3 V-1: Relativní procentuální pokles rychlosti ultrazvuku.....	57

Graf 3.2.5-4 V-1: Rychlost šíření ultrazvuku zobrazená v půdorysném rastru.....	58
Graf 3.2.5-5 V-2: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách.....	59
Graf 3.2.5-6 V-2: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření ultrazvuku.....	60
Graf 3.2.5-7 V-2: Rychlost šíření ultrazvuku zobrazená v půdorysném rastru.....	60
Graf 3.2.5-8 V-3: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých bodech	62
Graf 3.2.5-9 V-3: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření ultrazvuku.....	62
Graf 3.2.5-10 V-3: Rychlost šíření ultrazvuku zobrazená v půdorysném rastru.....	63
Graf 3.2.5-11 V-3: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách na rozvinutém pásu v průřezu s trhlinou.....	64

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1.1-1 Základní technické požadavky žuly pro kamenické výrobky	12
Tabulka 2.1.2-1 Základní technické parametry pískovce pro kamenické výrobky.....	15
Tabulka 3.1.5-1 Souhrn všech naměřených hodnot	45
Tabulka 3.1.5-2 Souhrn všech naměřených hodnot	45
Tabulka 3.2.1-1 Naměřené hodnoty krychlí.....	47
Tabulka 3.2.1-2 Naměřené hodnoty hranolů.....	48
Tabulka 3.2.1-3 Naměřené hodnoty vzorků tvaru válce	49
Tabulka 3.2.2-1 Nasákavost zkušebních těles	50
Tabulka 3.2.3-1 Objemová hmotnost zkušebních těles	50
Tabulka 3.2.4-1 Pevnost v prostém tlaku stanoveném na vysušených vzorcích	51
Tabulka 3.2.4-2 Pevnost v prostém tlaku nasycených vzorků.....	52
Tabulka 3.2.5-1 Rychlost šíření ultrazvuku krychlemi.....	53
Tabulka 3.2.5-2 Rychlost šíření ultrazvuku hranoly	54
Tabulka 3.2.6-1 Souhrn všech naměřených hodnot rychlostí šíření ultrazvuku na válcích	65

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1 – Stručný přehled ostatních sloupů.....	I
---	---

PŘÍLOHY

Příloha č.1 – Stručný přehled ostatních sloupů

Sloup 2-11

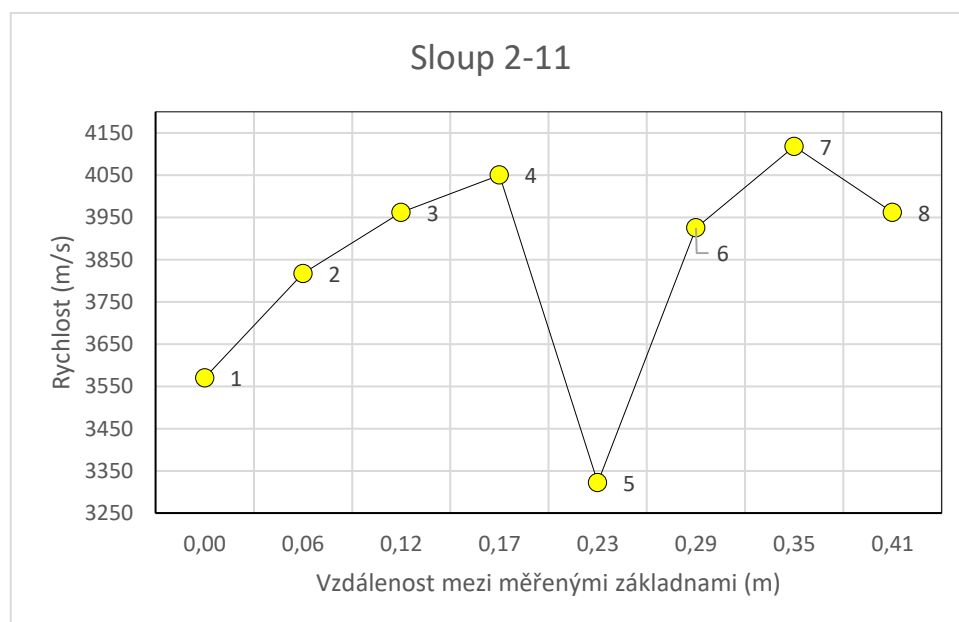
Měřen byl průřez ve výšce 620 mm od horní úrovně zábradlí, v tomto místě měl sloup průměr 292 mm a obvod 930 mm.



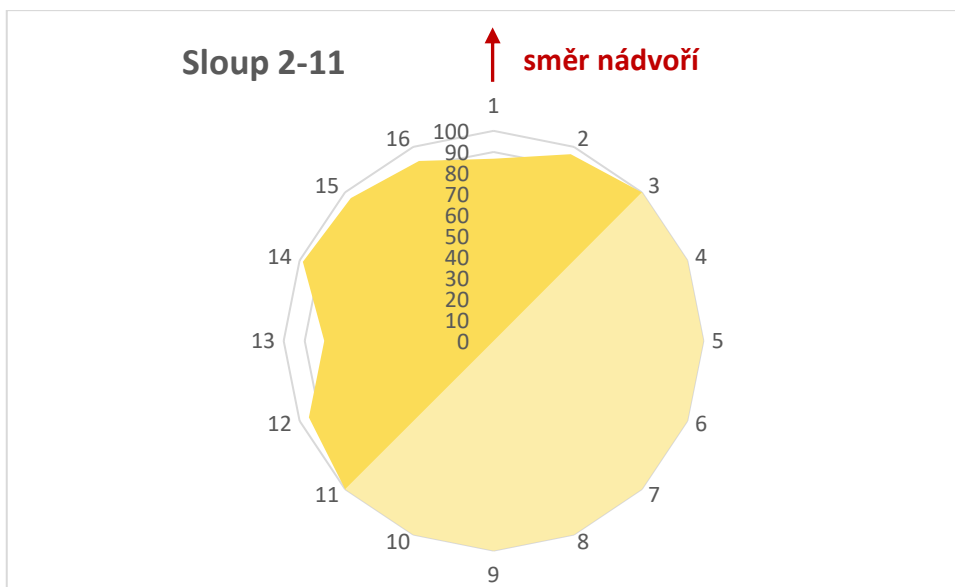
Obr. 1 Fotografie sloupu 2-11 [30]



Obr. 2 Detail měřeného úseku sloupu 2-11 [30]



Gr. 1 Sloup 2-11: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách



Gr. 2 Sloup 2-11: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření ultrazvuku

Sloup 2-21

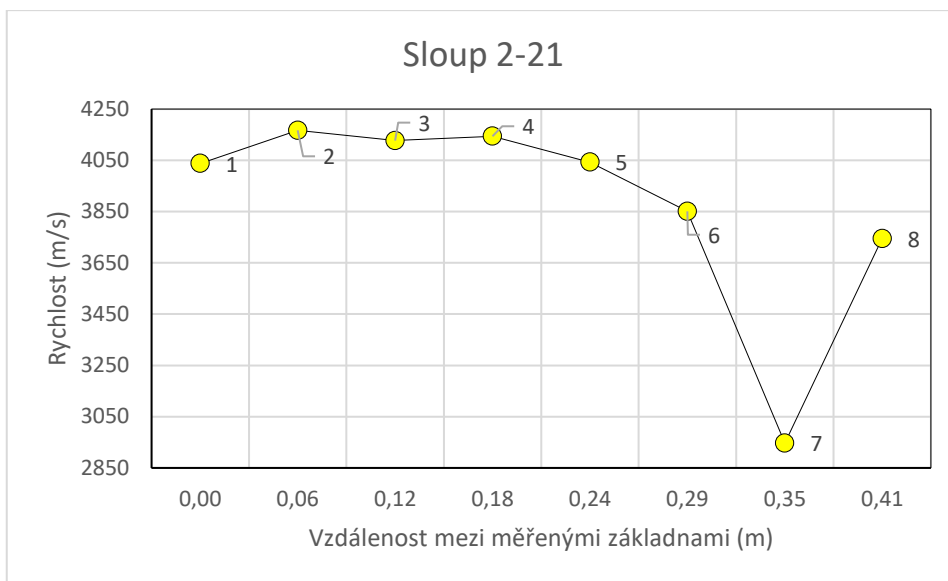
Měření bylo provedeno ve výšce 750 mm od horní úrovně zábradlí, v tomto místě měl sloup průměr 300 mm a obvod 943 mm.



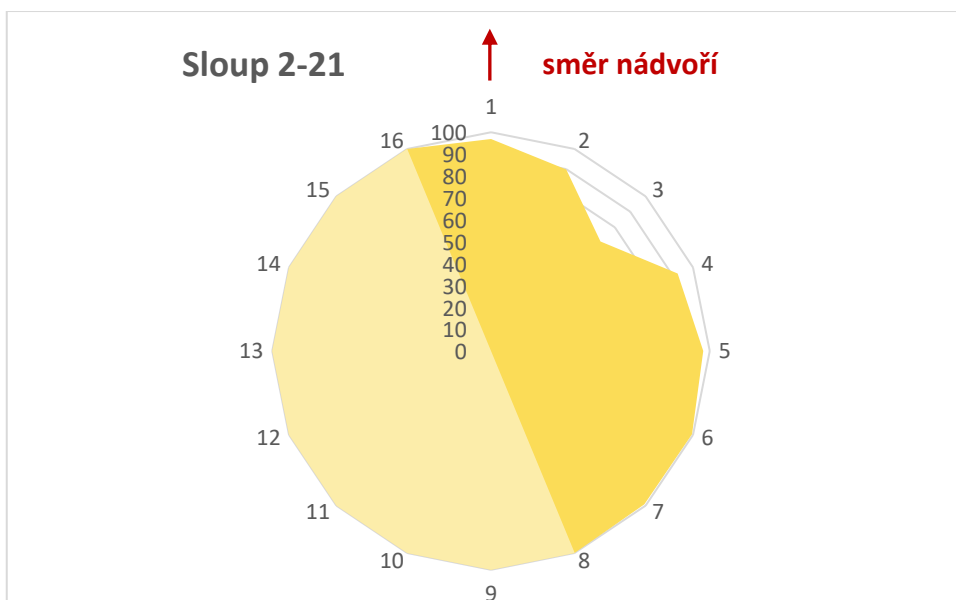
Obr. 3 Fotografie sloupu 2-21 [30]



Obr. 4 Detail měřeného úseku sloupu 2-21



Gr. 3 Sloup 2-21: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách



Gr. 4 Sloup 2-21: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření ultrazvuku

Sloup 2-22

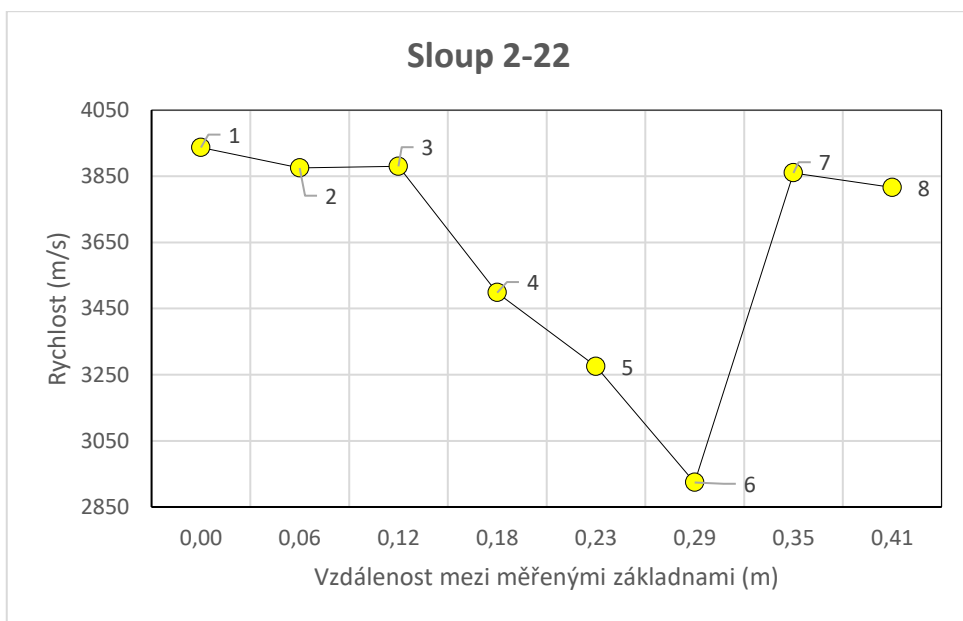
Měření bylo provedeno ve výšce 870 mm od horní úrovně zábradlí, v tomto místě měl sloup průměr 298 mm a obvod 930 mm.



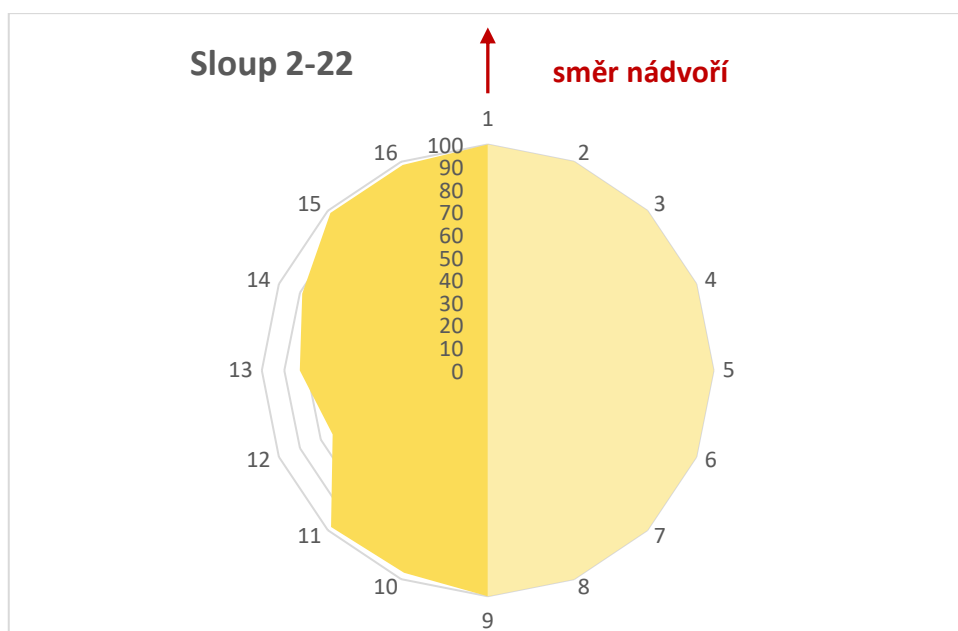
Obr. 5 Fotografie sloupu 2-22 [30]



Obr. 6 Detail měřeného úseku sloupu 2-22



Gr. 5 Sloup 2-22: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách



Gr. 6 Sloup 2-22: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření zvuku

Sloup 3-10

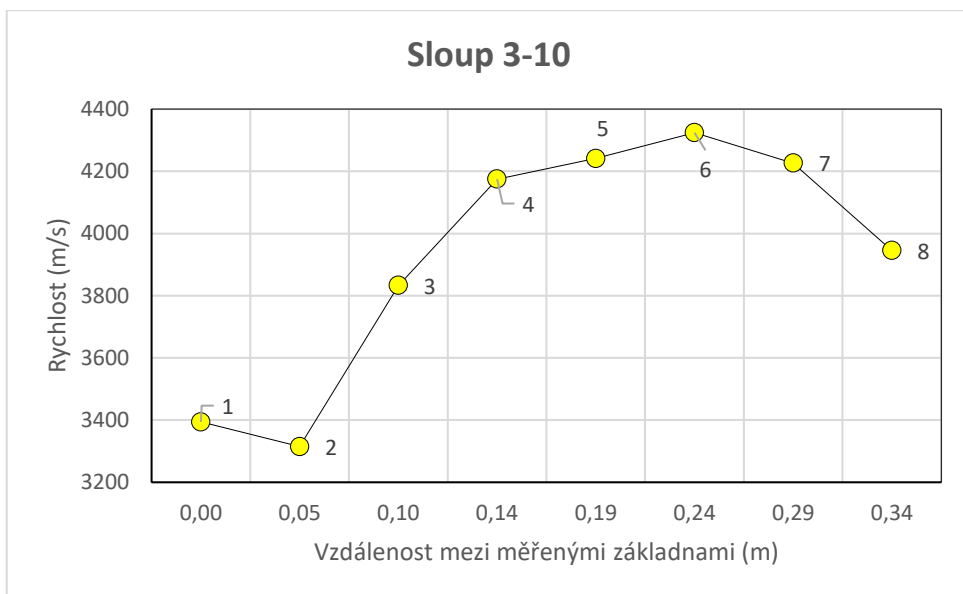
Měřen byl průřez ve výšce 410 mm od horní úrovně zábradlí, v tomto místě měl sloup průměr 243 mm a obvod 770 mm.



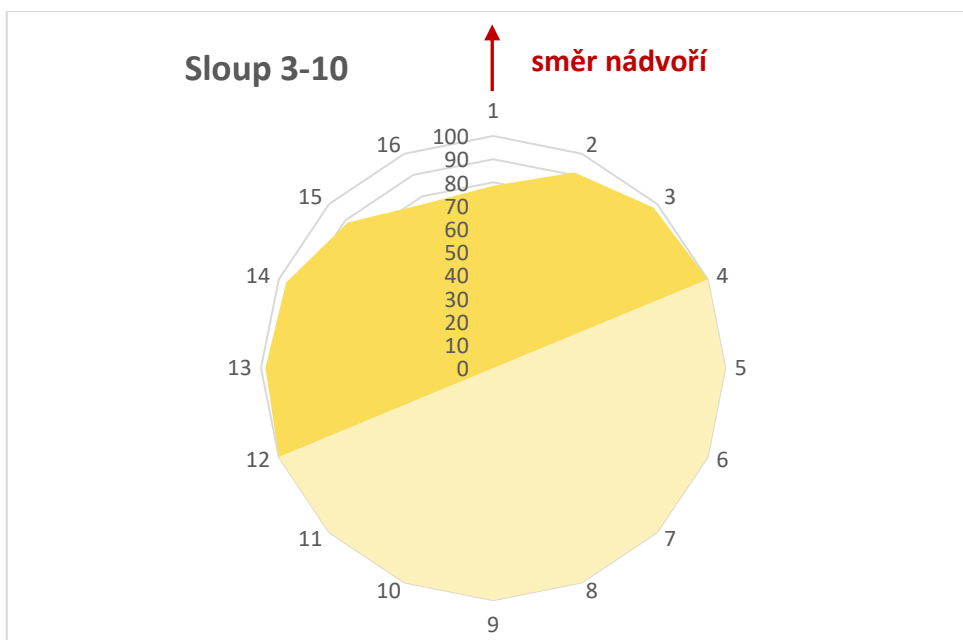
Obr. 7 Fotografie sloupu 3-10



Obr. 8 Detail měřeného úseku sloupu 3-10 [30]



Gr. 7 Sloup 3-10: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách



Gr. 8 Sloup 3-10: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření ultrazvuku

Sloup 3-11

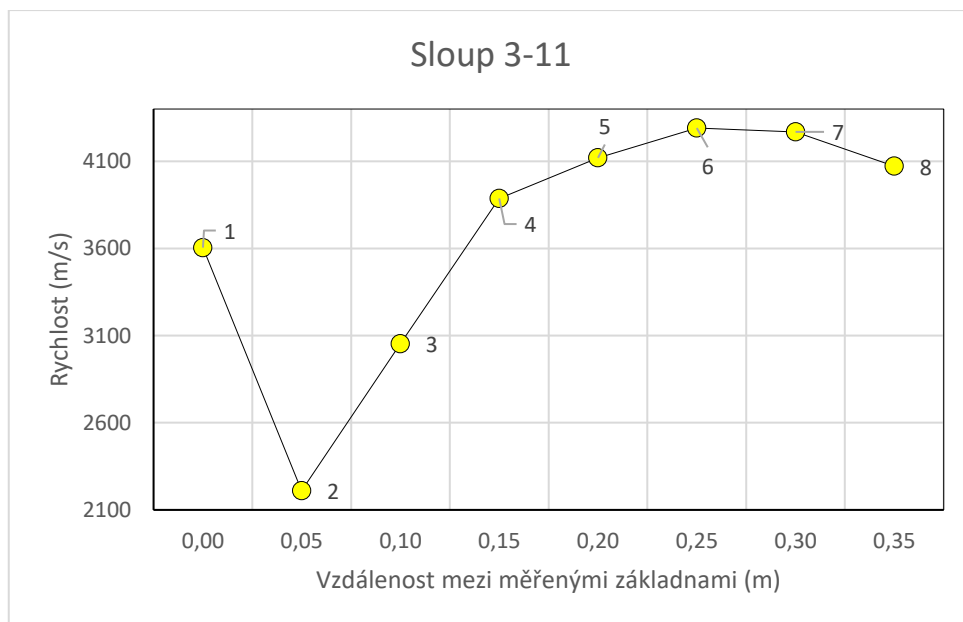
Měření bylo provedeno ve výšce 530 mm od horní úrovně zábradlí, v tomto místě měl sloup průměr 248 mm a obvod 800 mm.



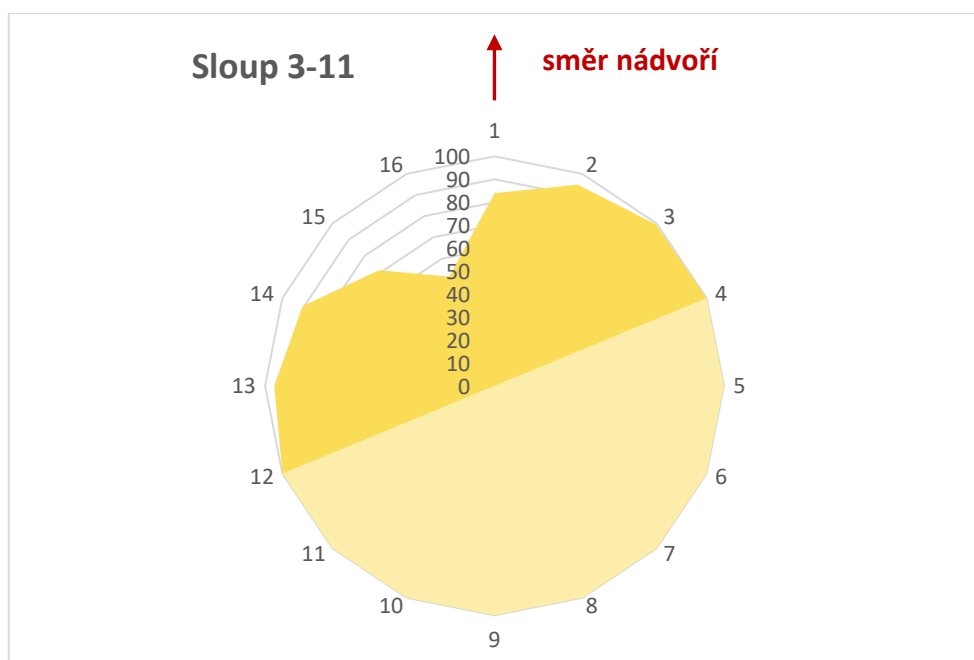
Obr. 9 Fotografie sloupu 3-11



Obr. 10 Detail měřeného úseku sloupu 3-11 [30]



Gr. 9 Sloup 2-11: Rychlost šíření zvuku v jednotlivých základnách



Gr. 10 Sloup 3-11: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření zvuku

Sloup 3-14

Sloup byl měřen ve dvou úsecích. Dolní úsek je označen 3-14.1 a horní úsek 3-14.2.



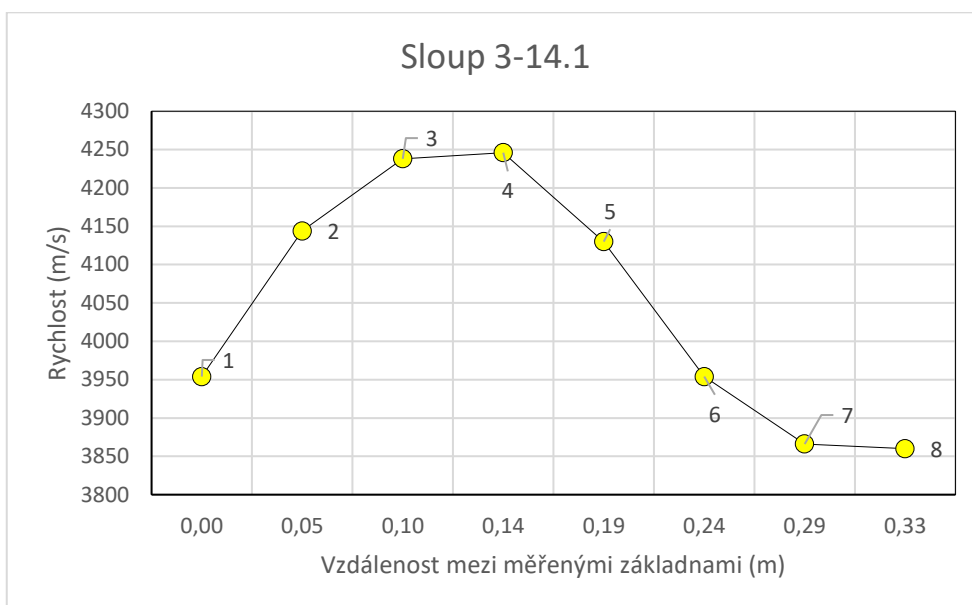
Obr. 11 Fotografie sloupu 3-14 [30]



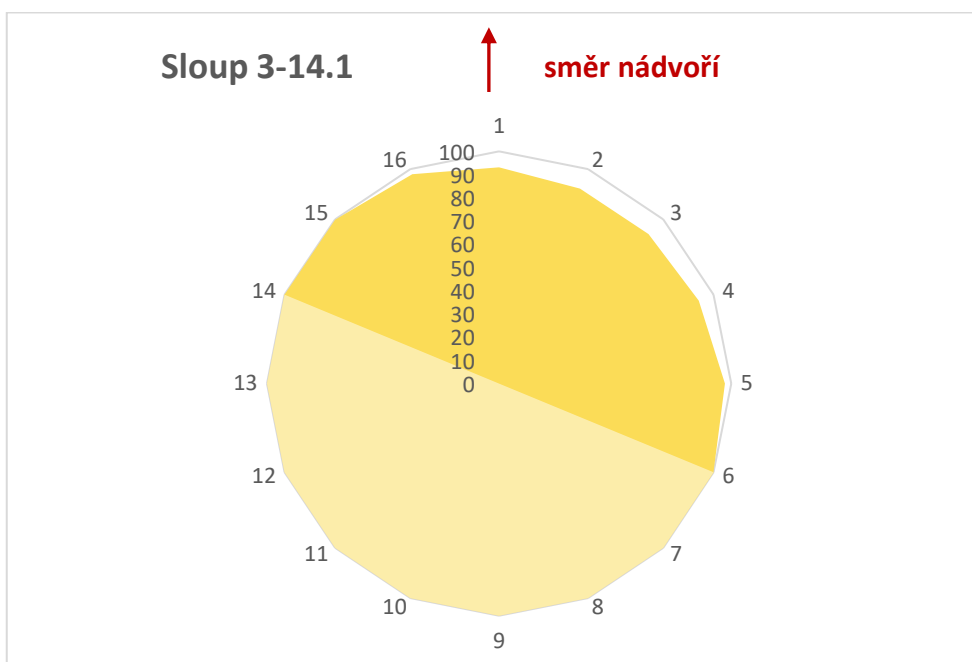
Obr. 12 Detail dolního úseku sloupu 3-14 [30]

Dolní úsek

V dolním úseku byl změřen průřez ve výšce 810 mm od horní úrovně zábradlí, v tomto místě měl sloup průměr 242 mm a obvod 760 mm.



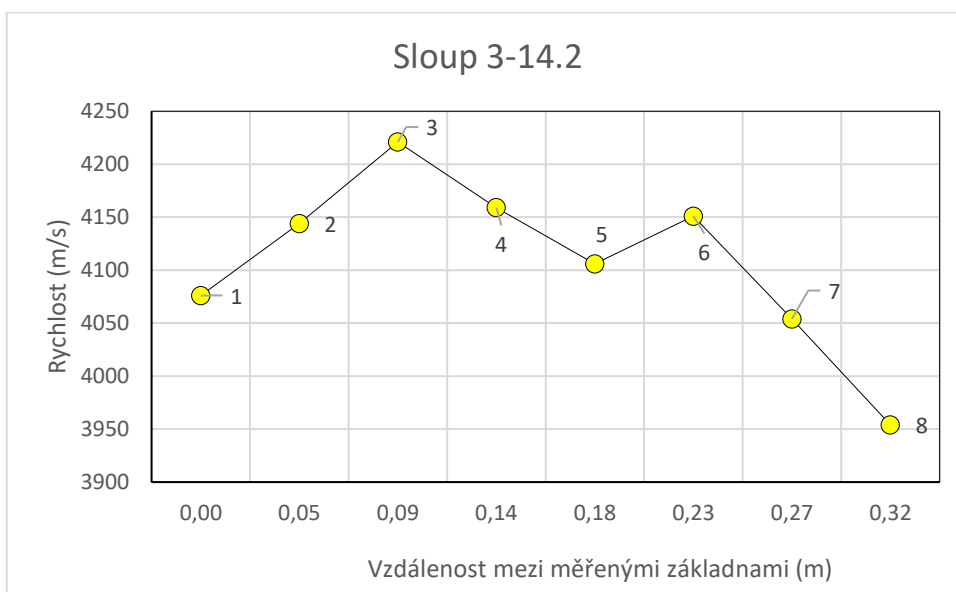
Gr. 11 Sloup 3-14.1: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách



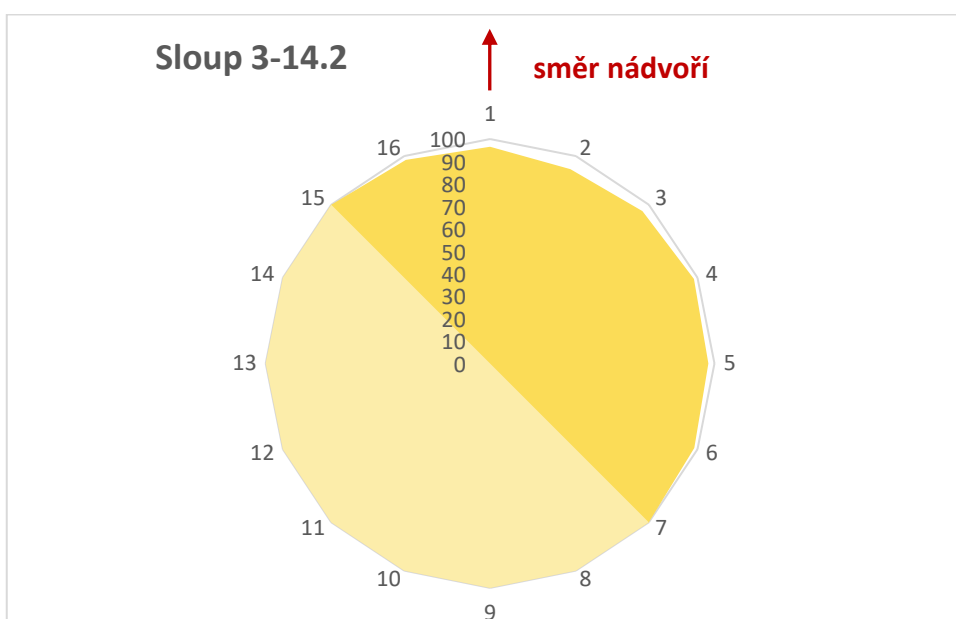
Gr. 12 Sloup 3-14.1: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření zvuku

Horní úsek

V horní úseku byl změřen průřez ve výšce 1 860 mm od horní úrovně zábradlí, v tomto místě měl sloup průměr 225 mm a obvod 720 mm.



Gr. 13 Sloup 3-14.2: Rychlost šíření zvuku v jednotlivých základnách



Gr. 14 Sloup 3.14-2: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření ultrazvuku

Sloup 3-21

Sloup byl měřen ve dvou úsecích. Dolní úsek je označen 3-21.1 a horní úsek 3-21.2.



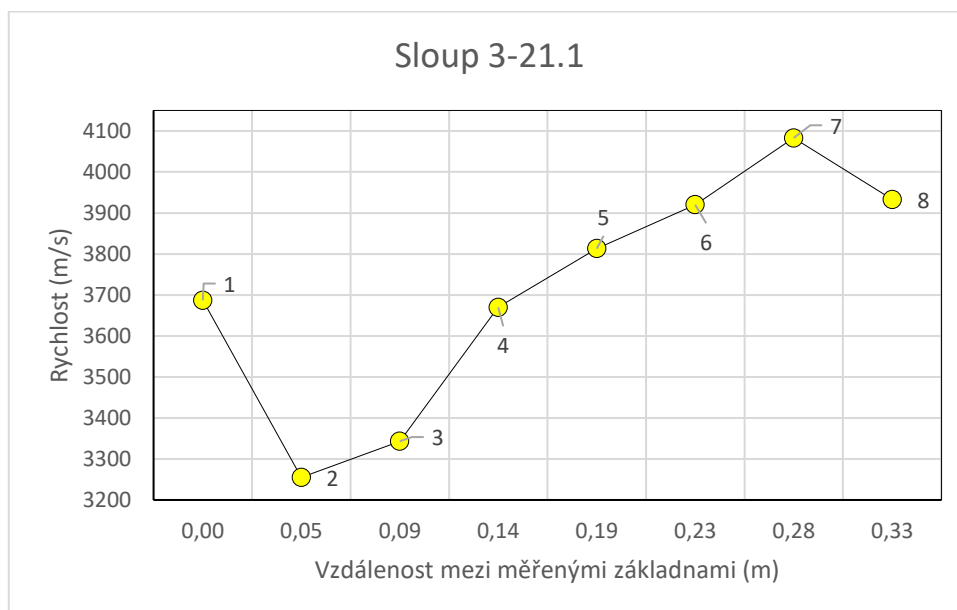
Obr. 13 Fotografie sloupu 3-21



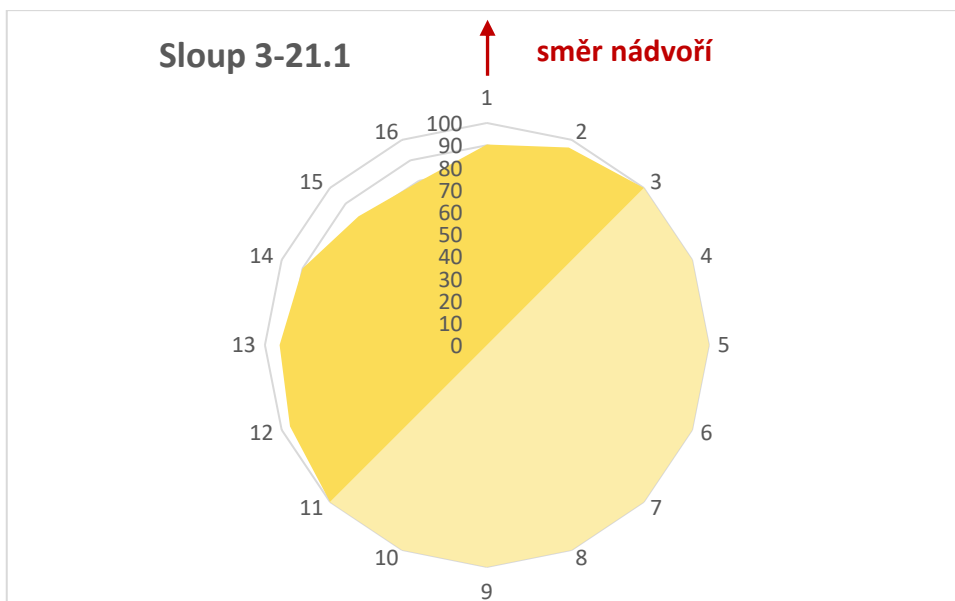
Obr. 14 Detail horního úseku sloupu 3-21 [30]

Dolní úsek

V dolním úseku byl změřen průřez ve výšce 310 mm od horní úrovně zábradlí, v tomto místě měl sloup průměr 236 mm a obvod 760 mm.



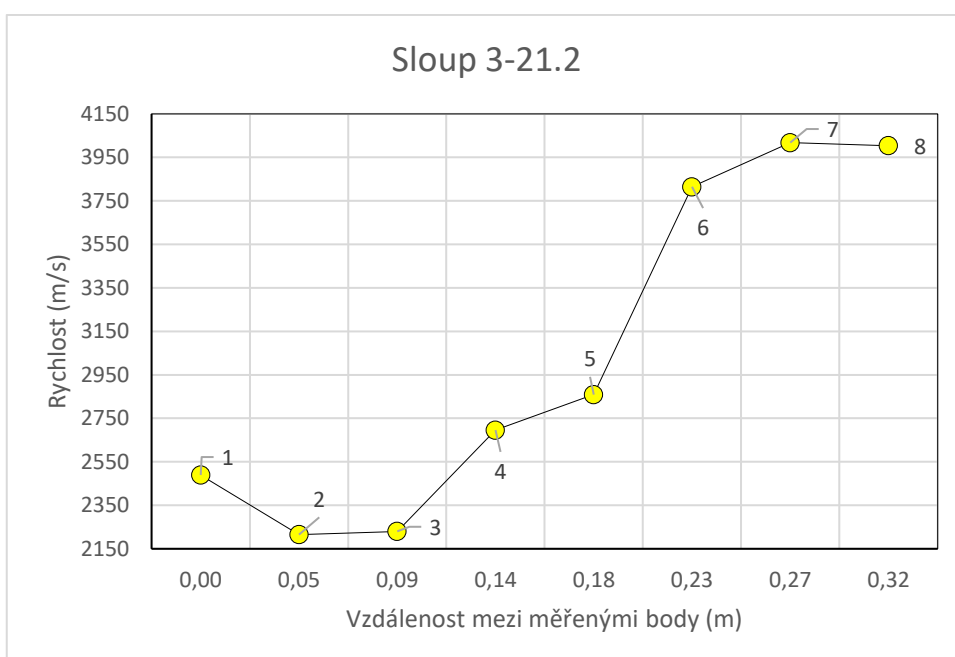
Gr. 15 Sloup 3-21.1: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách



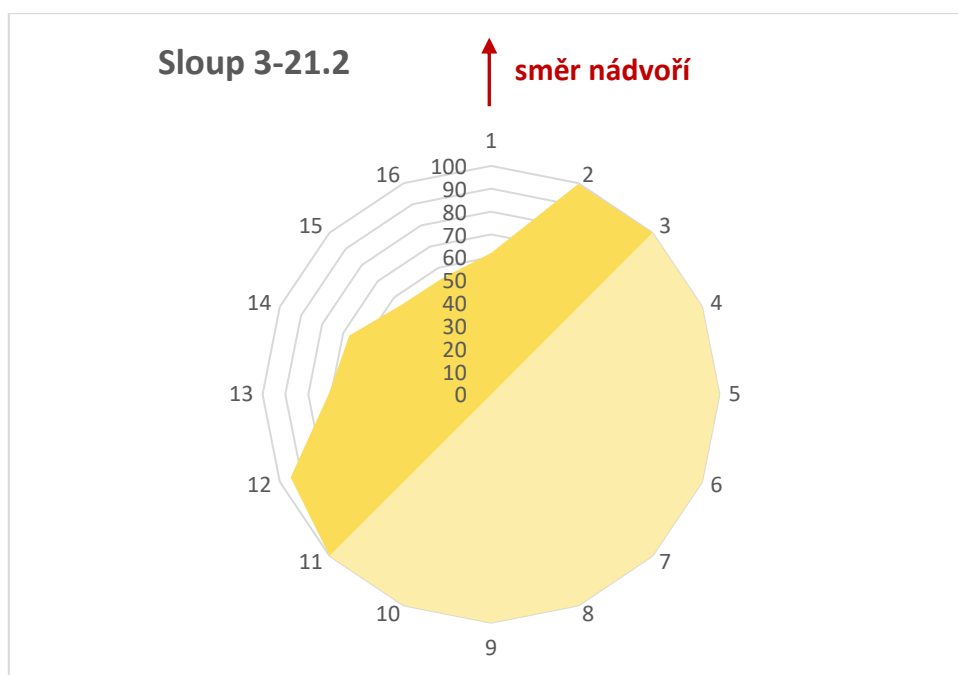
Gr. 16 Sloup 3-21.1: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření ultrazvuku

Horní úsek

V horní úseku byl změřen průřez ve výšce 1 820 mm od horní úrovně zábradlí, v tomto místě měl sloup průměr 226 mm a obvod 720 mm.



Gr. 17 Sloup 3-21.2: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách



Gr. 18 Sloup 3-21.2: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření zvuku

Sloup 3-31

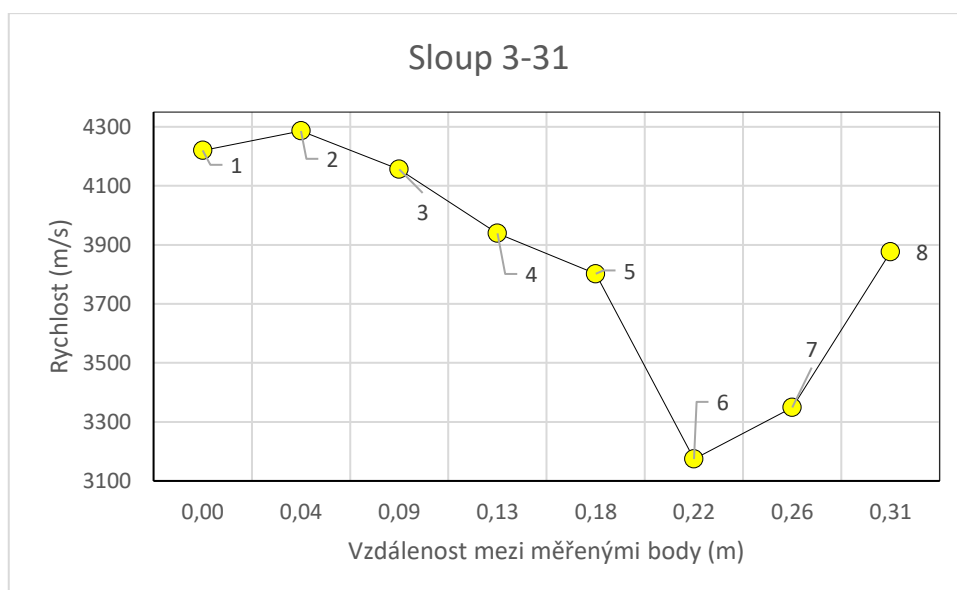
Měření byl průřez ve výšce 1 670 mm od horní úrovně zábradlí, v tomto místě měl sloup průměr 219 mm a obvod 700 mm.



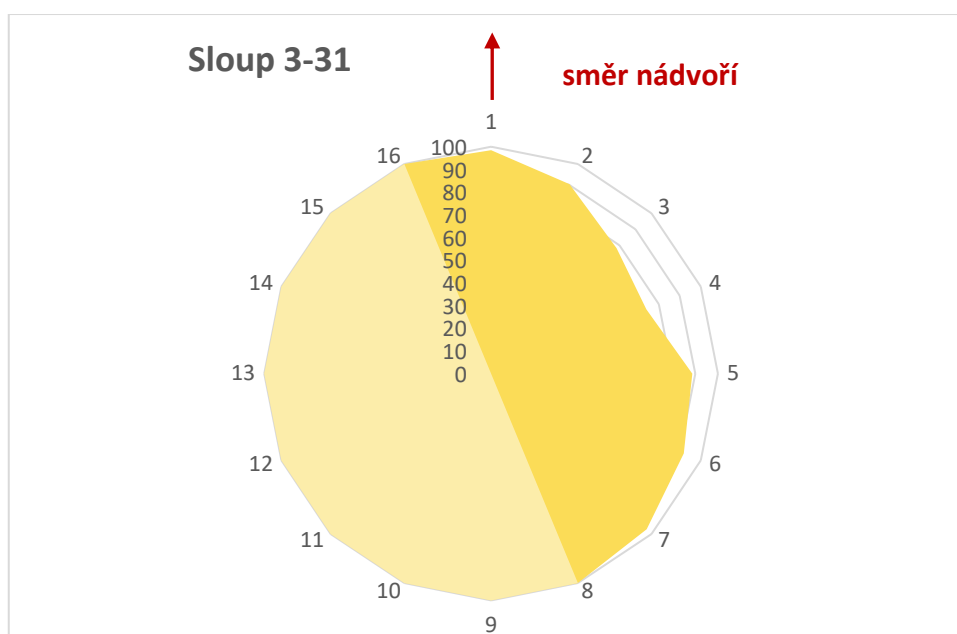
Obr. 15 Fotografie sloupu 3-31



Obr. 16 Detail měřeného úseku 3-31



Gr. 19 Sloup 3-31: Rychlost šíření ultrazvuku v jednotlivých základnách



Gr. 20 Sloup 3-31: Relativní procentuální pokles rychlosti šíření ultrazvuku